

SÉRIE A N° 947

N° d'ordre

1771

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS-SCIENCES PHYSIQUES

PAR

M. Jean GRANIER

INGÉNIEUR DIPLOMÉ DE L'ÉCOLE SUPÉRIEURE D'ÉLECTRICITÉ
PRÉPARATEUR A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE MONTPELLIER

1^{re} THESE. — LES PERTES D'ÉNERGIE DANS LES DIÉLECTRIQUES.

2^e THESE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

Soutenues le 9 Juillet 1923, devant la Commission d'examen

MM. PAUL JANET. *Président*

CH. FABRY } *Examineurs*
M. GUICHARD . . }



12, PLACE DE LABORDE, PARIS (VIII^e)

1923

SÉRIE A N° 947

N° d'ordre

1771

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS-SCIENCES PHYSIQUES

PAR

M. Jean GRANIER

INGÉNIEUR DIPLOMÉ DE L'ÉCOLE SUPÉRIEURE D'ÉLECTRICITÉ
PRÉPARATEUR A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE MONTPELLIER

1^{re} THESE. — LES PERTES D'ÉNERGIE DANS LES DIÉLECTRIQUES.

2^e THESE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

Soutenues le 9 Juillet 1923, devant la Commission d'examen

MM. PAUL JANET. *Président*

CH. FABRY
M. GUICHARD .. } *Examineurs*



12, PLACE DE LABORDE, PARIS (VIII^e)

1923

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

MM.

Doyen..... MOLLIARD, *Professeur*. Physiologie végétale.

Doyen honoraire P. APPELL.

*Professeurs hono-
raires*..... P. PUISEUX.
VÉLAIN.
BOUSSINESQ.
PRUVOT.

Emile PICARD....	Analyse supérieure et algèbre supérieure.
KENIGS.....	Mécanique physique et expérimentale.
GOURSAT.....	Calcul différentiel et calcul intégral.
HALLER.....	Chimie organique.
JOANNIS.....	Chimie (Enseignement P. C. N.).
JANET.....	Electrotechnique générale.
WALLERANT.....	Minéralogie.
ANDOYER.....	Astronomie.
PAINLEVÉ.....	Mécanique analytique et mécanique céleste.
HAUG.....	Géologie.
H. LE CHATELIER	Chimie générale.
Gabriel BERTRAND	Chimie biologique.
Mme P. CURIE..	Physique générale et radioactivité.
CAULLERY.....	Zoologie (Evolution des êtres organisés).
C. CHABRIÉ.....	Chimie appliquée.
G. URBAIN.....	Chimie minérale.
Emile BOREL....	Calcul des probabilités et Physique mathém.
MARCHIS.....	Aviation.
Jean PERRIN....	Chimie physique.
ABRAHAM.....	Physique.
CARTAN.....	Mécanique rationnelle.
Cl. GUICHARD....	Géométrie supérieure.
LAPICQUE.....	Physiologie.
GENTIL.....	Géographie physique.
VESSIOT.....	Théorie des groupes et calcul des variations.
COTTON.....	Physique générale.
DRACH.....	Application de l'analyse à la géométrie.
C. FABRY.....	Physique.
Charles PÉREZ..	Zoologie.
Léon BERTRAND.	Géologie appliquée et géologie régionale.
DANGEARD.....	Botanique.
LESPIEAU.....	Théories chimiques.
LEDUC.....	Physique théorique et physique céleste.
MONTEL.....	Mathématiques générales.
MAURAIN.....	Physique du globe.
RABAUD.....	Biologie expérimentale.
WINTREBERT....	Anatomie et physiologie comparées.
HÉROUARD.....	Zoologie.
Rémy PERRIER..	Zoologie (Enseignement P. C. N.)
SAGNAC.....	Physique théorique et physique céleste.
PORTIER.....	Physiologie.
BLAISE.....	Chimie organique.
PÉCHARD.....	Chimie (Enseignement P. C. N.).
AUGER.....	Chimie analytique.
M. GUICHARD....	Chimie minérale.
GUILLET.....	Physique.
<i>Secrétaire</i>	Daniel TOMBECK.



A Monsieur Paul JANET,
Membre de l'Institut

A Monsieur Ch. FABRY

Très respectueux hommage



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41554011_0023

A Messieurs

BEAULARD DE LENAIZAN et CABANNES

Hommage respectueux et reconnaissant

PREMIÈRE THÈSE

LES PERTES D'ÉNERGIE DANS LES DIÉLECTRIQUES

INTRODUCTION

I. GÉNÉRALITÉS. — L'étude expérimentale des diélectriques est intéressante pour un certain nombre de raisons :

Les tensions utilisées dans l'industrie sont de plus en plus élevées et ne sont actuellement limitées que par la difficulté de donner aux isolants une rigidité électrostatique suffisante ; or, celle-ci est intimement liée aux pertes qui s'y produisent.

Pour les fréquences élevées, en téléphonie et en radiocommunication par exemple, une notable partie de l'énergie est absorbée dans les diélectriques.

Enfin, une étude expérimentale seule peut nous permettre de choisir entre les différentes théories proposées et nous renseigner sur la nature intime de ces pertes.

II. CLASSEMENT. — On peut classer les diélectriques en plusieurs catégories :

A. *Diélectriques parfaits*. — Ils restituent instantanément à la décharge toute la quantité d'électricité qu'ils ont absorbée à la charge. Exemple : air, soufre.

B. *Diélectriques imparfaits sans fuites*. — Ils restituent encore toute la quantité d'électricité qu'on leur a fournie, mais la décharge est plus ou moins lente. Exemple : certains échantillons de mica ou d'ébonite.

C. *Diélectriques imparfaits avec fuites*. — Ils ne restituent qu'une partie de la quantité d'électricité absorbée à la charge.

Il ne paraît pas exister de condensateur constitué avec un diélectrique homogène possédant des fuites sans résidus.

III. DIÉLECTRIQUES PARFAITS. — L'étude expérimentale des diélectriques parfaits est simple ; elle se réduit à la détermination du pouvoir inducteur spécifique. Leur étude théorique a donné lieu, par contre, à des travaux considérables : pour pouvoir appliquer la loi de Coulomb sans admettre que la force qui s'exerce entre deux masses dépend du milieu interposé, on a été amené à considérer les diélectriques comme susceptibles de se polariser sous l'influence du champ électrique. Cette manière de voir, qui fait jouer au diélectrique un rôle actif, permet de concevoir dans leur masse des courants de déplacement produisant les mêmes effets magnétiques que les courants de conduction ; à cause de sa souplesse, elle est aujourd'hui universellement adoptée.

IV. DIÉLECTRIQUES IMPARFAITS. — Ils ont donné lieu, depuis le milieu du siècle dernier, à un grand nombre de recherches. Voici les principaux résultats expérimentaux obtenus :

A. *Courant continu.* — Les résidus ne proviennent pas d'une pénétration des charges dans les parties du diélectrique qui sont en contact direct avec les armatures ; le contact, en effet, n'est pas nécessaire, et les résidus se produisent très bien lorsque le diélectrique est séparé des armatures par des intervalles d'air.

Les résidus ne proviennent pas d'une conductibilité uniforme du diélectrique. En effet, dans le cas du contact, le courant de charge d'un condensateur à mica ou à ébonite tend vers zéro au bout d'un temps fini ; de plus, dans le cas du non contact, la charge des armatures est plus faible que si la lame diélectrique était remplacée par une lame métallique de même épaisseur. Il existe donc des diélectriques à résidus s'opposant absolument à un passage permanent d'électricité.

Un diélectrique à résidus *se polarise lentement* dans un champ électrique. Constituons, par exemple, le diélectrique d'un condensateur par deux lames d'ébonite superposées, et chargeons-le pendant un temps suffisamment long. Retirons ensuite les plaques d'ébonite et étudions leur état électrique : nous constatons que chacune d'elles est neutre au cylindre de Faraday, mais agit sur un électroscope. Puisque leur masse totale est nulle et qu'elles sont capables de produire un champ électrique, c'est qu'elles sont polarisées ; rien ne nous prouve, d'ailleurs, que cette polarisation

réelle est de même nature que celle dont nous avons *supposé* l'existence dans les diélectriques parfaits.

Le pouvoir inducteur spécifique correspondant à la charge très rapide d'un condensateur à résidus est bien déterminé et caractérise le diélectrique. Au contraire, la grandeur des résidus varie suivant la provenance de l'échantillon étudié. En outre, la chaleur et l'humidité qui agissent relativement peu sur le pouvoir inducteur spécifique ont une action considérable sur les résidus.

Les diélectriques obéissent en général, à la loi de superposition : Si deux tensions A et B appliquées séparément produisent des courants représentés en fonction du temps par les courbes a et b , le courant produit par la tension $A + B$ sera représenté par la courbe obtenue en additionnant les ordonnées de a et de b .

Il peut arriver qu'un certain temps après la suppression du champ extérieur la polarisation moyenne change de signe à l'intérieur du diélectrique. Si, par exemple, on soumet un condensateur pendant longtemps à une certaine tension, puis pendant un temps relativement court à une tension de sens inverse et qu'enfin, on le mette en communication permanente avec un galvanomètre, on constate que le courant de décharge diminue peu à peu puis change de signe ; ce courant est déterminé au début par la dernière tension appliquée, à la fin par la première.

B. *Courant alternatif*. — D'autres recherches avaient été effectuées parallèlement en courant alternatif ; elles ont abouti à des résultats beaucoup moins sûrs. Les premières expériences ont porté sur l'échauffement des condensateurs, mais les conditions d'essai étaient tout à fait défavorables ; les tensions, fournies par des machines électrostatiques ou par des bobines d'induction, étaient mal déterminées ; les échauffements, mesurés par des soudures thermoélectriques mal protégées contre le refroidissement étaient trop faibles. Aussi les résultats furent-ils souvent contradictoires.

Plus tard, on réussit à montrer que les diélectriques à résidus étaient le siège, en courant alternatif, d'une hystérésis plus ou moins visqueuse ⁽¹⁾ et l'on put tracer des cycles correspondant à des fréquences et à des tensions différentes. Malheureu-

⁽¹⁾ Un cycle de viscosité dépend de la fréquence ; un cycle d'hystérésis en est indépendant.

sement, les résultats de ces expériences délicates ne peuvent être considérés que comme qualitatifs.

On reconnut également que, dans un champ électrique tournant, les diélectriques à résidus sont soumis à un couple qui tend à les entraîner dans le même sens que le champ ; de même, un tel diélectrique, oscillant dans un champ constant est soumis à un amortissement supplémentaire. L'étude de ces deux phénomènes est très difficile et n'a donné aucun résultat certain.

Entre temps, les mesures calorimétriques furent reprises, mais, pour que les phénomènes fussent plus réguliers, on s'adressa à des tensions sinusoïdales et on choisit des fréquences ou des capacités suffisantes pour que l'échauffement fût directement mesurable au thermomètre.

Enfin, plus récemment, les progrès accomplis dans la construction des appareils de mesure électriques ont permis de mesurer facilement les pertes au wattmètre et de multiplier les expériences.

Nous aurons l'occasion de revenir plus tard sur toutes ces méthodes et de les étudier en détail. Bornons-nous ici à indiquer les résultats expérimentaux obtenus avant nous :

La puissance absorbée par les diélectriques en courant alternatif est, en général, proportionnelle à une certaine puissance de la tension qui oscille, suivant les auteurs, entre 1,5 et 2,5. Elle varie ordinairement dans le même sens que la température et paraît à peu près proportionnelle à la fréquence.

On voit que ces résultats sont fort peu précis ; nous connaissons actuellement assez bien l'allure des phénomènes, mais nous ne possédons encore aucune loi sûre qui nous permette de calculer à l'avance l'énergie absorbée dans des conditions déterminées. Les contradictions entre les résultats des diverses expériences que nous venons de rappeler tiennent, pensons-nous, aux causes suivantes :

1° Les divers échantillons d'une même substance ne donnent pas, dans les mêmes conditions, des résultats identiques ; cela se produit à plus forte raison pour des substances différentes. Il faut donc, si l'on veut obtenir des lois générales, opérer sur un nombre considérable de condensateurs.

2° Les méthodes de mesure sont presque toutes entachées d'erreurs systématiques. Il faut donc opérer sur chaque échantillon avec plusieurs méthodes.

3° La précision des mesures étant relativement faible, il n'est possible de mettre en évidence l'influence de la tension ou de la fréquence que si l'on fait varier celles-ci dans de très larges limites.

4° Pour que les résidus ne soient pas négligeables devant la charge instantanée, il convient d'opérer sur de *très mauvais* condensateurs.

V. PROGRAMME. — J'ai essayé de préciser les résultats précédemment obtenus ; l'expérience m'a montré que les pertes dépendent beaucoup moins de la nature chimique du diélectrique que du soin que l'on a apporté à son épuration et à la confection du condensateur. L'étude spéciale d'un échantillon ne présente, par suite, qu'un intérêt relatif et je me suis surtout attaché à perfectionner les méthodes de mesure et à les comparer entre elles.

Le chapitre I contiendra les résultats obtenus en courant continu.

Dans le chapitre II, je tracerai le cycle de viscosité sous tension sinusoïdale et j'en déduirai la capacité et les pertes.

Dans le chapitre III, j'exposerai des méthodes plus rapides qui permettent d'étudier les condensateurs sans nécessiter le tracé complet du cycle.

Dans le chapitre IV, je montrerai l'influence que peuvent avoir sur les pertes les causes les plus diverses.

Enfin, je grouperai dans le chapitre V un certain nombre de considérations théoriques ; je chercherai, d'abord, le minimum de paramètres nécessaires pour caractériser un condensateur ; je terminerai en discutant les diverses théories qui se proposent d'expliquer la viscosité diélectrique.

Mes expériences ont été faites à la Faculté des Sciences de Montpellier. J'adresse un souvenir reconnaissant au regretté M. Leenhardt, Maître de Conférences qui m'a aimablement accueilli dans son laboratoire. Je remercie vivement M. le Professeur Beaulard de Lenaizan et M. Cabannes, Maître de Conférences qui ont bien voulu s'intéresser à mes travaux et me donner toute facilité pour les poursuivre.

M. Paul Janet, Membre de l'Institut, qui m'avait prodigué ses conseils à l'Ecole supérieure d'Electricité, n'a cessé de m'encourager dans mes recherches ; je le prie d'agréer ici l'hommage de ma profonde gratitude.

VI. — SOURCES DE COURANT UTILISÉES. — Les courants utilisés dans mes expériences étaient de fréquences très différentes, et il m'était impossible de les produire tous avec la même machine ; avant de commencer l'étude des diélectriques, je dirai quelques mots des générateurs employés :

A. *Fréquences très basses* (au-dessous de quelques périodes par seconde). — Il est impossible dans ce cas de se servir d'un alternateur, les forces électromotrices d'induction étant trop faibles pour ces fréquences. La solution employée ordinairement consiste à utiliser un contact qui glisse d'un mouvement uniforme sur un fil parcouru par un courant constant. J'ai utilisé ce dispositif en le modifiant légèrement de manière à obtenir une tension sinusoïdale.

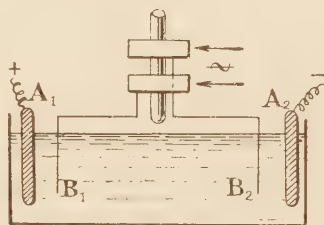


Fig. 1.

Dans une cuvette rectangulaire (fig. 1), remplie d'eau acidulée, plongent deux larges lames de plomb A_1 A_2 qui tapissent entièrement deux côtés opposés ; deux autres électrodes mobiles B_1 B_2 constituées par des fils de cuivre verticaux sont portées par un axe vertical animé d'un mouvement de rotation uniforme. En alimentant les électrodes fixes de ce rhéostat à 110 volts continus par exemple, on obtient facilement entre les électrodes mobiles une tension qui varie sinusoïdalement entre — 80 volts et + 80 volts. La proportion d'acide ne doit pas être exagérée pour que la dépense de courant ne soit pas trop forte, mais elle doit être suffisante pour que les lignes de courant dans le liquide ne soient pas déformées par la dérivation due au courant de charge des condensateurs.

Les variations de fréquence sont obtenues en modifiant la composition du train d'engrenages qui relie l'appareil au moteur électrique qui l'entraîne. Lorsque la fréquence dépasse 2 par seconde, on remplace, pour éviter les projections, le liquide par un épais tapis imprégné d'eau acidulée.

B. *Fréquences industrielles.* — Je disposais de deux groupes moteurs générateurs.

1° Alternateur monophasé tétrapolaire de 3 kv-A, entraîné par un moteur à courant continu, fonctionnant sous 110 volts ; l'induit de l'alternateur était lisse, bobiné en anneau ; on réglait la fréquence en alimentant l'induit du moteur par un nombre variable d'accumulateurs. Cette disposition donnait toute satisfaction au point de vue de la stabilité du régime ; en outre, la courbe de tension était une bonne sinusoïde.

2° Alternateur d'expériences, entraîné par un moteur à courant continu de 4 kw sous 220 volts. L'inducteur portait 12 pôles que l'on pouvait grouper à volonté de manière à obtenir des fréquences de 25, 50, 75 ou 150 périodes par seconde ; on pouvait de même, en groupant convenablement les bobines induites, obtenir des courants monophasés, diphasés ou triphasés.

Le moteur était alimenté par le courant du secteur, ce qui ne permettait un réglage précis ni pour la vitesse ni pour la tension ; en outre, sauf à la fréquence 150 p : s, la courbe de tension était relativement mauvaise. Aussi cet alternateur n'a été utilisé que pour des fréquences de 75 ou 150 p : s, impossibles à obtenir avec le premier ou lorsque j'avais besoin de courant diphasé.

C. *Fréquences téléphoniques.* — Je me servais d'un alternateur de radiotélégraphie du type K pour avions. Cet appareil se compose d'un alternateur à fer tournant et d'une machine à courant continu disposés dans la même carcasse ; la fréquence est de 900 p : s à la vitesse normale de 4 500 t : mn.

La force électromotrice de cet alternateur est riche en harmoniques, ce qui est un grand inconvénient pour les mesures ; en particulier au pont, on ne peut obtenir le silence absolu que si la tension d'alimentation est bien sinusoïdale. J'ai dû pour réaliser cette condition, faire subir au terme fondamental deux résonances successives. L'alternateur débitait sur un condensateur de 4 microfarads, une bobine de self-inductance à fer variable, un ampèremètre et une bobine de couplage ; celle-ci agissait sur un deuxième circuit contenant une capacité variable par crans entre 2 et 3 microfarads, un ampèremètre, un variomètre et deux bobines de self-inductance fixes sans fer ; l'une de celles-ci alimentait le pont.

Au début, j'employais comme moteur l'excitatrice de l'alternateur et je me suis alors heurté à une difficulté. Pour qu'il y ait

élimination suffisante des harmoniques, il faut que la résonance soit intense, ce qui conduit à un champ de résonance très limité ; dans ces conditions, une petite variation de vitesse influe beaucoup sur le courant débité par l'alternateur ; inversement une très légère modification dans la constitution du circuit de résonance influe beaucoup sur la charge et par suite sur la vitesse de l'alternateur ; le régime est donc très instable. J'ai été obligé, pour pouvoir faire des mesures précises, d'entraîner l'alternateur par un moteur séparé de 2 kw qui maintenait la vitesse rigoureusement constante malgré les variations du courant débité.

D. *Haute fréquence.* — Je n'ai utilisé que des ondes entrete-

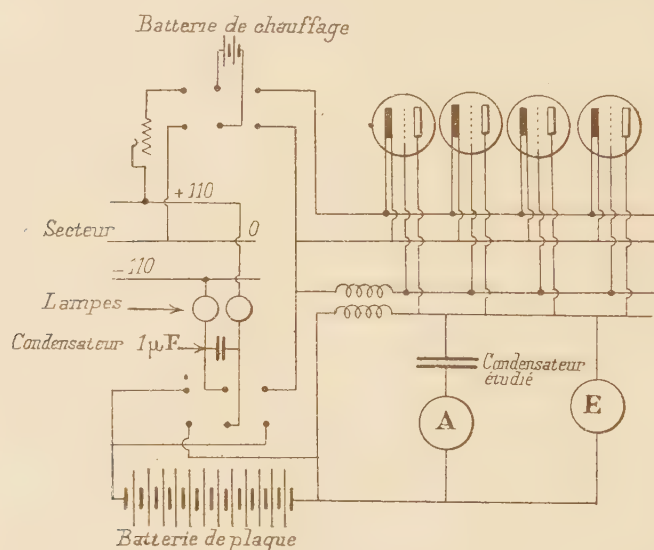


Fig. 2.

nues produites par des générateurs à lampes. Le montage variait légèrement suivant le but proposé ; pour les essais calorimétriques aux fréquences les plus élevées, voici la disposition adoptée (fig. 2) :

4 lampes sont montées en parallèle. Le courant de chauffage est pris sur une batterie de 3 éléments de 200 A-h ; le courant plaque est fourni suivant les cas par 2 batteries de 90 volts, 1 A-h ou par ces batteries en série avec le secteur à 220 volts. La bobine de grille est divisée en 4 sections qui permettent de réaliser entre les deux circuits le couplage minimum, ce qui correspond à une onde bien sinusoïdale ; la bobine de plaque est divisée en 10 sections, de sorte que l'on peut obtenir un certain nombre de longueurs d'onde pour une même capacité.

CHAPITRE I

PERTES EN COURANT CONTINU

I. CONDENSATEURS SANS FUITES, AVEC OU SANS RÉSIDUS. — A. Un *diélectrique* parfait restitue à la décharge toute l'énergie qu'on lui a fournie pendant la charge; on pourrait penser, par analogie, que l'utilisation à tension constante d'un *condensateur* dont le diélectrique est parfait entraîne, dans tous les cas, un rendement égal à l'unité. La question mérite cependant d'être examinée de plus près; avant d'aller plus loin, il convient de préciser ce que l'on entend par tension constante.

On peut imaginer d'abord que la tension est prise sur les barres d'une puissante usine et que les connexions sont faites en de grosse section.

Si on alimente ainsi un condensateur dont le diélectrique est parfait, le courant au début, est très grand et simplement limité par la résistance des armatures; lorsque, à fin de charge, le condensateur a emmagasiné la quantité d'électricité M , sous la tension V , il ne possède qu'une énergie électrostatique égale à $\frac{1}{2} MV$, tandis que l'usine a fourni MV ; la différence $\frac{1}{2} MV$ a été transformée en chaleur par effet Joule dans les armatures.

Si l'on suppose, au contraire, que la source de courant est une batterie de piles ordinaire, au début, c'est seulement par la résistance de la batterie que l'intensité est limitée; c'est dans la pile même que se produit la chute de tension. Le condensateur n'est plus soumis à une tension effectivement constante et l'effet Joule dans les armatures est négligeable si la résistance de la pile de charge est bien supérieure à celle des armatures. L'énergie emmagasinée dans le diélectrique n'est encore que la moitié de celle qu'a fourni la pile; l'autre moitié a été transformée en chaleur, tant dans les armatures que dans la pile.

B. — Dans un condensateur à résidus sans fuites, il n'en est plus tout à fait ainsi.

Sous tension *rigoureusement* constante, la charge se fait d'abord très rapidement, de sorte qu'il se dégage dans les armatures de la chaleur par effet Joule; ensuite se produit la charge de la capacité résiduelle avec une intensité beaucoup plus faible et un effet Joule négligeable dans les armatures; pendant

tout le temps que dure cette dernière charge, il se produit dans le diélectrique même un dégagement de chaleur. Finalement, quand le condensateur est complètement chargé, la moitié de l'énergie fournie par l'usine a été emmagasinée, l'autre moitié s'est transformée en chaleur, tant dans les armatures que dans le diélectrique.

Avec une pile résistante, les phénomènes sont beaucoup plus compliqués, l'énergie emmagasinée est encore la moitié de l'énergie électrique fournie par la pile, mais il s'est dégagé dans celle-ci même une certaine quantité de chaleur. La répartition de la chaleur entre la pile, les armatures et le diélectrique ne peut être précisée davantage dans le cas général ; ce problème est d'ailleurs sans intérêt et il est inutile de s'en occuper davantage.

Ainsi donc, si on charge un condensateur au moyen d'une source à courant continu, quelle que soit la résistance de cette source et celle des armatures, que le diélectrique possède ou non des résidus pourvu qu'il n'ait pas de fuites, la moitié de l'énergie électrique seulement est emmagasinée dans le diélectrique, l'autre étant transformée en chaleur ⁽¹⁾.

Dans le cas de condensateurs à fuites auxquels sont consacrés les paragraphes suivants, au début de la charge, les choses se passent de la même manière ; ensuite, la quantité d'électricité emmagasinée dans le diélectrique devient, à cause des fuites, de plus en plus inférieure à celle qu'a fournie la pile ; à cette perte de charge correspond une perte d'énergie bientôt plus considérable que celle qu'avaient produite au début les résidus. Ces pertes dues aux fuites étant de beaucoup les plus importantes, il est intéressant de connaître suivant quelles lois elles s'effectuent.

A cette question, le principe de superposition répond : « La quantité d'électricité perdue par les fuites est proportionnelle au temps et à la tension ».

Je me suis proposé de vérifier expérimentalement s'il en était ainsi dans tous les cas.

⁽¹⁾ Au contraire, avec une tension *progressivement croissante* ou sinusoïdale, l'intensité et l'effet Joule sont très faibles, de sorte que la supériorité du condensateur à diélectrique parfait apparaît immédiatement. Rien ne s'oppose, d'ailleurs, à ce que l'on charge un condensateur à résidus sans fuites avec un rendement aussi voisin de l'unité que l'on voudra ; il suffit pour cela de faire croître la tension d'alimentation assez lentement depuis zéro jusqu'à la valeur finale.

II. DÉFINITION DE LA CONDUCTANCE DE FUITES. — La loi de superposition a été vérifiée par M. Jacques Curie sur un grand nombre de cristaux (quartz, mica), mais s'est montrée en défaut dans quelques cas (sel gemme, alun). Il convient d'examiner si elle est applicable aux mauvais condensateurs usuels et en particulier comment il est possible de définir et de mesurer leur résistance.

Ayant d'intention d'étudier les condensateurs en courant alternatif, je ne puis adopter ici la définition de M. Jacques Curie ⁽¹⁾ qui appelle conductibilité le quotient évidemment variable de l'intensité instantanée par la tension ; il me faut déjà en courant continu séparer nettement les fuites et les résidus, puisque ces deux quantités jouent pour des courants alternatifs de fréquences différentes un rôle tout à fait distinct.

Par définition :

Si à la décharge on recueille une quantité d'électricité égale à celle que l'on a fournie à la charge, on dit que la conductance de fuites est nulle.

Si pendant une charge qui a duré un temps t , sous une tension U , on a fourni une quantité d'électricité Q et si, à la décharge on ne recueille qu'une quantité d'électricité Q' on dit que la quantité d'électricité $Q - Q'$ a été transportée par conduction et que la conductance moyenne de fuites pendant le temps t est :

$$\frac{1}{R} = \frac{Q - Q'}{Ut}.$$

Naturellement, la décharge doit être, en théorie, infiniment longue et se faire sur un court-circuit franc pour que l'on puisse recueillir toute la quantité d'électricité récupérable ; en pratique on la fait la plus longue possible, mais c'est là le point délicat des expériences. En outre, on s'arrange pour que la tension entre les armatures soit très faible, soit en employant des appareils de mesure électromagnétiques de résistance évidemment négligeable, soit en neutralisant la quantité d'électricité à mesure qu'elle se produit lorsqu'on emploie des appareils électrostatiques.

III. MESURE DE LA CONDUCTANCE DE FUITES. — D'après ce que l'on vient de lire, il faut, par définition, pour évaluer la con-

⁽¹⁾ J. CURIE. Recherches sur le pouvoir inducteur spécifique et sur la conductibilité des corps cristallisés. *Thèse*, Paris, 1888.

ductance de fuites, mesurer la charge puis la décharge du condensateur.

Si la charge est facile à évaluer au balistique, il n'en est pas de même de la décharge et la mesure de celle-ci est un problème extrêmement délicat à cause de la lenteur avec laquelle elle se produit. J. Curie, dans ses mesures, déterminait la quantité d'électricité mise en jeu dans la décharge en la compensant par celle que produisait l'action d'un poids connu sur un quartz piézo-électrique ; il reconnût ainsi que la décharge est très lente au point d'être encore appréciable au bout de quelques jours pour le quartz par exemple. Ce procédé exige de grandes précautions d'isolement, et je n'ai pas pensé qu'il fût pratique de l'appliquer couramment à des condensateurs industriels de capacité relativement considérable.

En utilisant des balistiques, j'ai dû reconnaître, après de longs essais, effectués dans diverses conditions, que les balistiques ordinaires sont incapables de mesurer, même si l'on se contente d'une grossière approximation, les décharges produites par les condensateurs usuels. La décharge étant, en effet, fort longue, on n'en enregistre qu'une partie relativement faible à la première élongation et l'on peut dans certains cas, observer, une fois que les oscillations se sont amorties, une déviation permanente notable, l'appareil se comportant alors en ampèremètre. Il convient d'insister sur ce fait parce qu'on doit voir là une cause d'insuccès pour certaines expériences faites autrefois par des auteurs qui n'avaient pas choisi convenablement leur balistique.

Il est difficile de calculer exactement l'erreur introduite par la lenteur de la décharge, mais on peut facilement se rendre compte de son existence. L'équation du mouvement est de la forme :

$$K \frac{d^2 \theta}{dt^2} + A \frac{d\theta}{dt} - C\theta = G \frac{dQ}{dt},$$

θ étant la déviation, Q la quantité d'électricité, K , A , C et G étant des constantes.

On en déduit immédiatement que la durée de la première élongation est différente de celle qu'on obtiendrait avec une décharge instantanée, et enfin que la grandeur de cette élongation n'est pas du tout proportionnelle à la décharge totale. A propos du tracé des cycles de viscosité, j'aurai l'occasion de donner

quelques exemples numériques pour montrer l'importance de l'erreur commise.

L'équation précédente montre que l'on peut cependant enregistrer convenablement la décharge à condition de supprimer le couple directeur. Elle devient, en effet, dans ce cas :

$$K \frac{d^2 \theta}{dt^2} + A \frac{d \theta}{dt} = G \frac{dQ}{dt} \quad \text{ou} \quad K \frac{d \theta}{dt} + A \theta = G Q,$$

qui, intégrée entre deux positions où le système mobile est au repos, montre que la déviation finale est proportionnelle à la décharge totale et indépendante de l'inertie du cadre.

J'ai essayé de me mettre dans ces conditions en utilisant des fluxmètres industriels système Grassot ; les résultats obtenus, quoique meilleurs, furent peu satisfaisants : les sensibilités n'étaient pas de l'ordre de grandeur désiré, le couple directeur n'était pas suffisamment annulé et, enfin, dans les modèles à pivots, les frottements quoique très réduits, étaient suffisants pour arrêter l'équipage mobile lorsque l'intensité du courant de décharge était tombée au-dessous d'une certaine valeur.

J'ai alors été conduit à transformer des balistiques de type usuel ; après un certain nombre de tâtonnements je me suis arrêté aux solutions suivantes :

A. Le cadre mobile est suspendu par un fil plat, aussi mince et aussi long que possible. Dans ces conditions, le couple de torsion est extrêmement faible. Avec du fil plat Carpentier n° 2 et une longueur de 1,50 m, j'ai obtenu des durées d'oscillations doubles de l'ordre de 5 minutes en circuit ouvert. Lorsque ce balistique était shunté par une résistance de quelques ohms seulement, l'amortissement rendait sa marche beaucoup plus lente encore. J'ai pu, avec cet appareil, enregistrer convenablement des décharges d'une durée inférieure à 10 minutes ; il m'a suffi pour le tracé des cycles de viscosité aux fréquences ordinaires.

B. Dans les expériences où les capacités employées étaient faibles, il m'était impossible de shunter aussi énergiquement le balistique, de sorte que l'action du couple de torsion était plus sensible. J'ai alors opposé à ce couple un autre de sens contraire et ne pouvant songer à produire ce dernier au moyen de petites aiguilles aimantées par suite de la proximité de dynamos, j'ai utilisé le dispositif indiqué par M. Abraham ⁽¹⁾.

⁽¹⁾ A. ABRAHAM. *Comptes-rendus de l'Académie des Sciences*, 1896, t. CXXII, p. 882.

On compense le couple de torsion à l'aide du poids du cadre.

Pour cela, on porte le centre de gravité du cadre un peu en avant de son axe de rotation à l'aide d'une petite surcharge ; on penche ensuite l'appareil en arrière, en agissant sur ses vis calantes, jusqu'à ce que la durée d'oscillation soit celle que l'on désire ; il ne faut pas aller au-delà d'une certaine limite, sans quoi l'équilibre deviendrait instable et le cadre se renverserait en arrière sous l'action de la surcharge, malgré la torsion du fil.

C. Enfin, pour les fréquences très faibles et pour les essais en courant continu, les dispositifs précédents se sont montrés insuffisants.

J'ai alors pensé, pour annuler l'action du couple de torsion pendant la décharge, à maintenir constamment l'équipage mo-

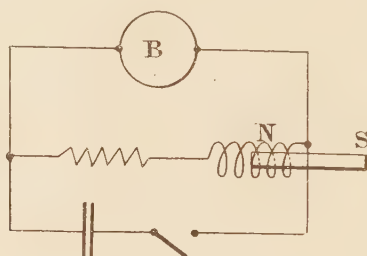


Fig. 3.

bile au zéro ; pour cela, j'ai utilisé une décharge auxiliaire, égale à celle du condensateur et dont je pouvais, à volonté, faire varier la vitesse d'écoulement.

En série avec le shunt (ou avec le balistique) on dispose (fig. 3) une bobine à l'intérieur de laquelle peut pénétrer un aimant coulissant sur une glissière en bois. Le déplacement de cet aimant provoque dans la bobine des courants induits qui se ferment dans le balistique et si celui-ci a un couple de torsion suffisamment faible et un amortissement considérable, sa déviation ne dépend que de la position de l'aimant. Il est facile d'ailleurs de le constater expérimentalement : le balistique étant au zéro, on déplace arbitrairement l'aimant à l'intérieur de la bobine pendant quelques secondes puis on le ramène à sa position primitive ; on vérifie que le spot revient aussitôt au zéro.

Une mesure se fait alors de la manière suivante :

On déplace d'abord l'aimant pour amener le spot au zéro, puis, après avoir mis momentanément le balistique en court-cir-

cuit pour l'empêcher de dévier, on retire complètement l'aimant de la bobine en le faisant coulisser sur sa glissière jusqu'à une butée qui définit sa position. Après avoir donné au shunt une valeur convenable ⁽¹⁾, on décharge le condensateur et, en même temps, on enfonce lentement l'aimant dans la bobine de manière à maintenir le spot sensiblement au zéro pendant toute la durée de la décharge. Enfin, quand celle-ci est terminée, on retire brusquement l'aimant de la bobine et le balistique indique alors une élongation proportionnelle à la quantité d'électricité débitée par le condensateur.

Cette manière de procéder ne comporte qu'une erreur relativement faible ; voici un exemple pour préciser :

En observant d'abord le balistique au repos pendant un quart d'heure, on vérifie que son zéro est bien fixe et qu'il n'est influencé par aucune dérivation due aux fuites ⁽²⁾ ; on constate également que si, pendant une décharge, on supprime brusquement le condensateur, l'amortissement est assez considérable pour que le spot s'arrête aussitôt, de sorte que l'on peut négliger la force vive de l'équipage mobile au cours d'une décharge lente. Ces précautions prises, on décharge un condensateur, *l'aimant restant immobile* et l'on note en fonction du temps les élongations suivantes :

Temps:	0 s	10 s	20 s	30 s	1 mn	2 mn	3 mn	4 mn	5 mn	6 mn
Elongations en mm :	0	30	50	65	89	108	114	114	113	112

Au bout de 6 minutes on arrête la décharge et l'on voit le spot revenir lentement au zéro à la vitesse de 4 mm par minute; il s'ensuit que les chiffres trouvés plus haut ne sont pas exacts et devraient être augmentés en première approximation de 2 mm pour le 5^e, 6 mm pour le 6^e, 10 mm pour le 7^e, 14 mm pour le 8^e, etc.

La mesure directe, même avec ce balistique dont le couple de torsion est pourtant très réduit, donne donc des résultats nettement trop petits.

La mesure est alors recommencée en compensant la charge. Après avoir laissé le condensateur en court-circuit pendant une

⁽¹⁾ La résistance du shunt, différente suivant la capacité des condensateurs étudiés ne dépassait jamais une dizaine d'ohms, de sorte que l'amortissement du balistique était très considérable.

⁽²⁾ Pour éviter les fuites, toutes les connexions avaient été faites en fil de cuivre rigide, n'ayant de contact qu'avec les bornes des appareils et ceux-ci étaient isolés sur de gros blocs de paraffine.

heure, on le charge, puis on le décharge dans les mêmes conditions, mais en manœuvrant l'aimant de manière à maintenir le spot sensiblement au zéro. Au bout de 25 minutes, alors que la décharge paraît complète, l'aimant est retiré et l'on observe une élévation de 168 mm.

Il est facile de calculer une limite supérieure de l'erreur commise. Au début de la décharge, pendant 2 secondes environ, quelques tâtonnements avaient été nécessaires ; mais, pendant cette période, la déviation était restée nettement inférieure à 10 mm ; pendant le reste de la décharge, elle n'avait pas atteint 1 mm de part et d'autre du zéro. La quantité d'électricité qui peut ne pas avoir été enregistrée du fait de l'existence d'un couple de torsion correspond donc, au grand maximum, à un nombre de millimètres égal à

$$\left[\frac{2 \text{ s}}{60 \text{ s}} \times \frac{10 \text{ mm}}{112 \text{ mm}} + \frac{25 \text{ mm}}{1 \text{ mm}} \times \frac{1 \text{ mm}}{112 \text{ mm}} \right] \approx 4 \text{ mm}$$

quantité inférieure à 1 millimètre.

L'erreur dans cette manière de procéder dépend donc uniquement de la patience de l'opérateur qui doit prolonger pendant un temps suffisamment long la décharge et le court-circuit antérieur à la charge. On peut, enfin, remarquer que, dans ces conditions, la différence de potentiel aux bornes du condensateur *est rigoureusement* nulle ; de sorte que la décharge est complète et ne peut pas être influencée par les fuites du diélectrique.

La manœuvre de l'aimant est particulièrement facile lorsque le but de l'essai est la mesure d'une résistance, parce qu'il suffit alors de déterminer en une seule opération la différence entre la charge et la décharge, sans chercher à savoir suivant quelles lois celles-ci s'effectuent.

Lorsqu'on se propose, par contre, d'étudier la décharge en fonction du temps, il faudrait faire un étalonnage préalable pour connaître quelle est la quantité d'électricité qui correspond à chaque position de l'aimant. J'ai préféré alors remplacer celui-ci par une bobine sans fer fixe intérieure à l'autre et alimentée à tension variable. Le courant qui la parcourt, mesuré au milliampèremètre est proportionnel à la quantité d'électricité qui a traversé le balistique.

IV. RÉSULTATS D'EXPÉRIENCES. — Un certain nombre d'essais ont

porté sur des condensateurs à diélectrique de verre, ébonite, mica; ils ont confirmé le principe de superposition à l'approximation de mes mesures; il me paraît inutile de donner le détail de ces expériences, qui ne font que retrouver un fait déjà bien connu.

Il convient d'insister, au contraire, sur celles qui ont été faites avec de mauvais condensateurs à diélectrique plus complexe, à papier imprégné par exemple. Dans les premières mesures, je me bornais à mesurer en bloc la différence $Q - Q'$ entre la charge et la décharge. J'ai constaté dans plusieurs cas que le rapport $\frac{t}{Q - Q'}$ qui devait représenter la résistance, augmentait lentement lorsque la charge devenait plus longue; il était pourtant possible d'interpréter d'une autre manière ce résultat expérimental en admettant que la décharge était si lente qu'une partie seulement pouvait être enregistrée, malgré la longue durée de l'observation. J'ai alors pensé qu'il serait utile d'étudier séparément la charge et la décharge. Voici les résultats correspondant à une série de mesures effectuées sur des condensateurs au papier paraffiné de fabrication industrielle :

Les condensateurs étaient d'abord chargés pendant quelques minutes, puis déchargés. Pendant ce temps, on notait soigneusement les indications de l'appareil, sauf quelques instants avant la décharge, qui étaient employés pour la remise au zéro. Ce premier essai terminé, on en recommençait un autre beaucoup plus long, en se contentant le plus souvent de mesurer de temps en temps la quantité d'électricité écoulée en une minute.

CONDENSATEUR N° 3

Première série d'essais. — Au temps zéro, mise du condensateur sous tension.

Quantité totale d'électricité absorbée au bout de :

30 s.	1 mn.	2 mn.	3 mn.	4 mn.	5 mn.
75 div.	130 div.	260 div.	380 div.	500 div.	610 div.

Après 6 minutes de charge, commencement de la décharge.

Quantité totale d'électricité restituée au bout de :

1 mn.	2 mn.	3 mn.	4 mn.	5 mn.	30 mn.
3,5 div.	5 div.	6,3 div.	7,5 div.	8,5 div.	18 div.

Deuxième série d'essais. — Après 1 heure de décharge, on recommence la charge.

Quantité d'électricité absorbée par minute au bout d'un temps de charge égal à :

50 mn.	2 h. 10	4 h.	16 h.
60 div. p. mn.	28 div. p. mn.	23 div. p. mn.	13 div. p. mn.
9 h.	24 h.	26 h.	40 h.
11 div. p. mn.	8 div. p. mn.	7 div. p. mn.	5 div. p. mn.

Après 40 heures de charge, on recommence la décharge.

Quantité totale d'électricité restituée au bout de :

1 mn.	2 mn.	5 mn.
0,3 div.	0,5 div.	1 div.

Quantité d'électricité restituée par minute au bout de :

2 h.	9 h.
0,2 div. p. mn.	0,15 div. p. mn.

CONDENSATEUR N° 4

Première série d'essais. — Au temps zéro, mise du condensateur sous tension.

Quantité totale d'électricité absorbée au bout de :

30 s.	1 mn.	2 mn.	3 mn.	4 mn.	5 mn.
80 div.	130 div.	205 div.	280 div.	350 div.	420 div.

Après 6 minutes de charge, commencement de la décharge.

Quantité totale d'électricité restituée au bout de :

1 mn.	2 mn.	5 mn.	30 mn.
10 div.	16 div.	30 div.	57 div.

Deuxième série d'essais. — Après 1 heure de décharge, on recommence la charge.

Quantité d'électricité absorbée par minute au bout de :
4 heures : 24 div. par mn.

Après 4 heures de charge, on recommence la décharge.

Quantité totale d'électricité restituée au bout de :

1 mn.	2 mn.	5 mn.
2 div.	3 div.	5 div.

Troisième série d'essais. — Après 10 minutes de décharge, la charge a été recommencée pendant 18 heures.

Quantité d'électricité absorbée par minute au bout de (y compris le temps de la charge précédente) :

6 h.	8 h.	22 h.
22 div. p. mn.	19 div. p. mn.	12 div. p. mn.

Après 18 heures, de charge, le condensateur est de nouveau déchargé.

Quantité totale d'électricité restituée au bout de :

1 mn.	2 mn.	5 mn.	10 mn.	20 mn.
2 div.	3 div.	6 div.	10,5 div.	18 div.

Quantité d'électricité restituée par minute au bout de :

1 h.	5 h.	52 h.	56 h.
0,8 div. p. mn.	0,75 div. p. mn.	0,4 div. p. mn.	0,4 div. p. mn.

CONDENSATEUR N° 15

Première série d'essais. — Au temps zéro, mise du condensateur sous tension.

Quantité totale d'électricité absorbée au bout de :

30 s.	1 mn.	2 mn.	3 mn.	4 mn.	5 mn.
48 div.	70 div.	115 div.	142 div.	170 div.	220 div.

Au bout de 6 minutes de charge, commencement de la décharge.

Quantité totale restituée au bout de :

30 s.	5 mn.
21 div.	25 div.

Deuxième série d'essais. — Après 10 minutes de décharge, la charge a été recommencée.

Quantité d'électricité absorbée par minute au bout de :

15 heures : 32 div. p. mn.

CONDENSATEUR N° 13

Charge au bout de 1 mn. moins décharge complète	77 div.
Courant permanent après 8 heures de charge	74 div. p. mn.
Courant permanent après 21 heures de charge	75 div. p. mn.

CONDENSATEUR N° 9

Charge au bout de 1 minute moins décharge complète	35 div.
Courant permanent après 8 heures de charge	31 div. p. mn.
Courant permanent après 21 heures de charge	30 div. p. mn.

V. CONCLUSION. — En possession de ces résultats, on peut comparer la conductance relative au commencement de la décharge à celle que l'on déduit de la valeur du courant au bout de plusieurs

heures de charge. En admettant que la décharge Q' a été complète, on obtient ainsi en unités arbitraires :

	Conductance moyenne au début de la charge	Conductance au bout d'un temps très long
Cond. N° 3.....	2	0,08
Cond. N° 4.....	0,86	0,2
Cond. N° 15.....	0,58	0,53
Cond. N° 13.....	1,28	1,25
Cond. N° 9.....	0,58	0,50

Ce tableau montre immédiatement qu'on peut considérer pratiquement les condensateurs N°s 15, 13 et 9 comme possédant une conductance de fuites bien définie. Au contraire, pour les condensateurs N°s 3 et 4, les conductances initiales et finales ne sont pas du même ordre de grandeur.

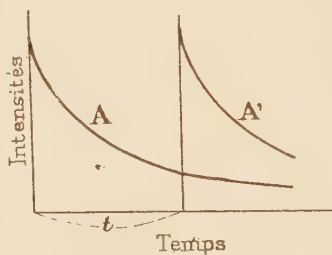


Fig. 4.

Comme je l'ai déjà dit, ce calcul suppose que la décharge Q' a été totalement enregistrée, de sorte que les résultats sont entachés d'une certaine erreur, très faible d'ailleurs. Mais ce qui ne fait aucun doute, c'est que les condensateurs N°s 3 et 4 ne suivent pas la loi de superposition; on peut affirmer cela sans restriction parce que dans cette preuve interviennent non pas les quantités totales d'électricité, toujours mal connues, mais des intensités parfaitement déterminées.

La loi de superposition conduit, en effet, pour une charge pendant un temps t suivie d'une décharge indéfinie à la construction suivante (fig. 4). :

Soit A la courbe représentant le courant de charge en fonction du temps, A' une courbe égale, mais ayant subi une translation égale à t . Le courant de décharge doit être égal à la différence des ordonnées de A et de A'.

Or, on voit que cette condition est loin d'être toujours satisfaite. Pour le condensateur n° 3, par exemple, après une charge de

40 heures, la quantité d'électricité écoulee pendant la première minute de décharge, devrait être égale à $130 - 5 = 125$, alors qu'elle n'est que de 0,3; pour le condensateur n° 4, après 22 heures de charge, au lieu de $130 - 12 = 118$, elle est égale à 2.

On remarque également, dans les tableaux précédents, un résultat un peu inattendu : pour les condensateurs N^{os} 3 et 4, plus la charge est longue, sauf au début sans doute, moins les résidus sont importants; j'ai vérifié ce fait sur un certain nombre d'autres mauvais condensateurs. Il convient d'ajouter, pour être complet, que dans ces mesures le diélectrique était soumis à un champ relativement intense ; j'opérais sous 100 volts environ, et pour les condensateurs N^{os} 3 et 4 l'épaisseur du papier paraffiné était de l'ordre de 0,01 mm, ce qui correspond à un champ de 100 000 volts par centimètre.

En résumé, pour certains condensateurs, le principe de superposition est absolument inapplicable. Pendant la charge, le courant de polarisation et le courant de conduction sont tous deux variables; une longue charge a pour effet d'éliminer à la fois la conduction de fuites et les résidus.

Tous ces faits s'expliquent aisément si l'on admet que le diélectrique contient des impuretés électrolytiques que le courant finit par déposer sur les armatures. Il n'y a pas lieu d'insister ici sur cette manière de voir; on doit retenir seulement de ce qui précède que la résistance d'un condensateur est très délicate à mesurer.

On verra dans les chapitres suivants que, en courant alternatif, certaines méthodes donnent les pertes par viscosité seule, d'autres la somme des pertes par viscosité et par conduction. Or, il vaut mieux étudier les pertes par viscosité pure qui varient évidemment suivant des lois plus simples que les pertes totales. On devra donc employer les méthodes qui donnent les pertes par viscosité de préférence aux autres, qui nécessitent une mesure de résistance en courant continu, mesure qu'il convient d'éviter le plus possible.

VI. REMARQUE. — Il n'entre pas dans mon programme de discuter à fond les méthodes ordinairement employées pour la mesure des grandes résistances; il me faut pourtant expliquer pourquoi je n'ai pas employé les plus usitées : celle de comparaison et celle de perte de tension.

A. *Méthode de comparaison.* — Le principe est celui-ci : Au moyen d'une pile puissante, on fait passer un courant à travers la

résistance à mesurer et un galvanomètre. On compare la déviation obtenue à celle que donne une résistance étalon après avoir, si c'est nécessaire, shunté le galvanomètre et abaissé la tension de la pile de charge.

Cette méthode, à cause de son peu de sensibilité, est surtout employée lorsque les condensateurs à étudier possèdent des fuites importantes; or, l'expérience montre que c'est dans le cas de ces mauvais condensateurs que l'épuration du diélectrique, sous l'influence du courant, se fait nettement sentir. On se trouve donc pris entre deux alternatives : ou bien on fait la lecture quelques instants seulement après la mise sous tension, et alors on enregistre non seulement le courant de fuites, mais encore un notable courant de polarisation; ou bien on fait la mesure au bout d'un temps très long et alors le courant de polarisation est bien négligeable, mais les effets de l'épuration se font sentir; on mesure correctement une résistance, mais ce n'est plus la résistance initiale.

B. *Méthode de perte de tension.* — Le condensateur à étudier est d'abord chargé par une pile de tension U_0 puis déconnecté. Il se décharge progressivement et au bout d'un temps t_1 , sa tension mesurée à l'électromètre n'est plus que U_1 . En écrivant que la diminution de tension provient uniquement du courant de fuites

$\frac{U}{R}$, on obtient :

$$\frac{U}{R} dt = - C dU, \quad R = \frac{t_1}{C \log \frac{U_0}{U_1}}.$$

Ce calcul suppose que le courant de polarisation est nul ou, ce qui revient au même, que la capacité est constante. Il est rigoureux dans le cas d'un condensateur parfait shunté par une résistance métallique. Il est, au contraire, théoriquement inapplicable aux condensateurs à résidus, la tension pouvant très bien diminuer sans qu'il y ait conductance réelle. Un condensateur à mica, par exemple, est susceptible d'une charge résiduelle qui est de l'ordre de 5 à 6 pour 100 de la charge instantanée et, d'autre part, la quantité d'électricité restituée à la décharge est égale à celle qui a été emmagasinée à la charge; il n'y a donc pas de fuites. La méthode de comparaison au bout d'un temps assez long, et celle que j'ai employée, donneront effectivement une résistance infinie; la méthode de perte de tension effectuée à l'électromètre

donnera, au contraire, une résistance d'autant plus faible, que la durée de l'expérience aura été plus courte.

On conclut de ce qui précède qu'il est impossible de mesurer la résistance d'un condensateur à résidus sans le décharger dans un balistique à période très longue ou sans mesurer sa capacité résiduelle par une méthode analogue.

CHAPITRE II

TRACÉ DU CYCLE DE VISCOSITÉ

I. HISTORIQUE. — A. C'est M. Janet ⁽¹⁾ qui, dans ses recherches sur les oscillations électriques, obtint le premier tracé d'une courbe d'hystérésis. Voici sommairement comment il opérait (fig. 5) :

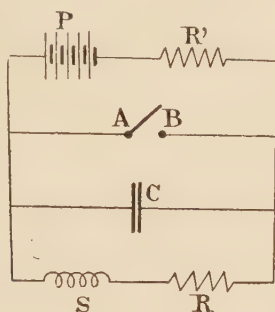


Fig. 5.

Le circuit d'une pile P comprend une résistance très grande R' , puis trois dérivations contenant : la première, un interrupteur AB normalement fermé; la deuxième, un condensateur C; la troisième, une self-inductance S en série avec une résistance ohmique R.

Un commutateur tournant permet de rompre brusquement le court-circuit AB, ce qui provoque des oscillations, puis de mesurer au bout d'un temps que l'on s'est fixé à l'avance, les tensions aux bornes de la self-inductance S et de la résistance R. Il est donc possible, en recommençant plusieurs fois l'expérience, de connaître en fonction du temps ces deux tensions; puis, en appliquant simplement les lois d'Ohm et de Kirchhoff et sans faire intervenir dans le calcul la notion de capacité, d'en déduire la tension U aux bornes du condensateur et le courant I qui le traverse; une simple intégration graphique de I en fonction du temps donne la charge Q emmagasinée.

⁽¹⁾ JANET. *Journal de Physique théorique et appliquée*, 3^e Série, tome II, 1893.

M. Janet opérait sur un condensateur à mica, avec des fréquences comprises entre 1 000 et 10 000 périodes par seconde. Il constata que le rapport $\frac{Q}{U}$ est variable pendant la durée des oscillations et que, si l'on représente la courbe des charges en fonction des tensions, on obtient non pas une droite passant par l'origine, mais une courbe plus ou moins compliquée. A tensions égales, les charges sont moins grandes pour des tensions croissantes que pour des tensions décroissantes; il n'existe donc pas dans ces conditions de capacité bien définie pour un condensateur à mica.

Mais, cette méthode, très élégante pour mettre en évidence l'existence d'une hystérésis diélectrique à des fréquences aussi élevées, ne peut être employée qu'avec des oscillations amorties. La courbe obtenue ne se ferme pas sur elle-même et ne nous renseigne pas sur la forme définitive que prendrait le cycle si le condensateur était soumis pendant un temps très long à des oscillations sinusoïdales.

B. Les expériences de Porter et Morris ⁽¹⁾ furent faites, quelque temps après, à de très basses fréquences, sur un condensateur à papier paraffiné de quelques microfarads.

Les armatures étant primitivement réunies, on les sépare, puis on établit entre elles une tension régulièrement croissante au moyen d'une dérivation à contact glissant prise sur le circuit d'une pile constante. Lorsque la tension a atteint une valeur, u , fixée à l'avance, on décharge le condensateur dans un balistique, on mesure l'impulsion, et enfin on réunit les armatures d'une manière permanente pour achever la décharge si elle n'a pas été complète. On recommence une deuxième expérience en amenant d'abord régulièrement la tension à une valeur $u' > u$, puis en la faisant diminuer jusqu'à u ; on décharge de nouveau.

Dans les deux expériences, les impulsions ont été trouvées égales, ce qui, d'après les auteurs, indique que le papier paraffiné est dénué d'hystérésis; pourtant, ces physiciens reconnaissent que le condensateur étudié possédait des résidus notables, puisque la charge qui aurait dû, à travers la résistance employée être complète à $\frac{1}{1\ 000}$ près en $\frac{1}{20\ 000}$ de seconde, se poursuit encore d'une manière sensible au bout de 5 secondes. Il y a là, semble-t-il, contradiction; le résultat négatif de ces expériences provient, pensons-

(¹) PORTER ET MORRIS. *Proceedings of the Royal Society*, t. LVII, 1895.

nous, de la faible durée d'oscillations de leur balistique (2,5 s) : dans un temps si court, les résidus lents qui, seuls, sont différents à la montée et à la descente, n'avaient pas le temps de se décharger.

C. Ces expériences furent reprises par M. Beaulard de Lenaizan ⁽¹⁾ qui, opérant d'une manière analogue, réussit à mettre en évidence l'hystérésis du mica et de la diélectrine; ce physicien construisit les cycles correspondants, évalua l'influence de la tension et de la fréquence, mais, comme il opérait à la main pour faire varier la tension, le tracé des cycles n'était pas d'une exactitude suffisante et les résultats obtenus sont peu certains; d'une manière générale, la perte d'énergie par cycle croît un peu plus vite que le carré de la tension et varie dans le même sens que la fréquence.

D. Les expériences de M. Beaulard de Lenaizan furent continuées et complétées par l'ingénieur Mercanton ⁽²⁾. Celui-ci, pour obtenir un fonctionnement régulier, utilisa un petit moteur hydraulique qui servait à la fois à faire varier la tension suivant une loi bien linéaire et à produire en temps voulu la décharge dans le balistique. Il opéra sur un grand nombre de substances, mais trouva que la plupart, comme par exemple l'huile de vaseline, les diélectrines, le mica, la paraffine pure, les mélanges de paraffine et de charbon ou de colophane, étaient dépourvus d'hystérésis; il ne put mettre celle-ci en évidence que pour le verre, la glace, les mélanges de paraffine et de noir de fumée.

Enfin, cet auteur trouva, dans plusieurs séries de mesures, que les pertes par cycle croissaient un peu plus vite que le carré de la tension et présentaient, lorsqu'on faisait varier la période, un maximum pour une valeur de celle-ci voisine de 1 seconde. Ces expériences, très soignées, auraient donné de meilleurs résultats si l'attention de l'auteur s'était portée sur le choix de son balistique. C'est à la trop courte durée d'oscillation de son balistique qu'il faut attribuer, pensons-nous, l'étrangement que présentent, au voisinage de l'origine, les cycles obtenus.

II. CYCLE REPRESENTANT LA QUANTITE D'ÉLECTRICITÉ EMMAGASINÉE.

— En principe, pour obtenir un point du cycle de viscosité, il suffit de soumettre le condensateur étudié à une tension alternative

⁽¹⁾ BEAULARD DE LENAIZAN. *Le Journal de Physique théorique et appliquée*, 3^e Série, t. IX, 1900.

⁽²⁾ MERCANTON. *Contribution à l'étude des pertes d'énergie dans les diélectriques*. Thèse. Lausanne, 1902.

pendant un temps suffisamment long, puis de le décharger dans un balistique. Après avoir chaque fois ramené le condensateur dans son état primitif en lui faisant parcourir un nombre de cycles suffisant, on obtient d'autres points de la courbe en produisant de nouvelles décharges à d'autres moments de la période.

A. *Dispositif expérimental.* — Le dispositif expérimental généralement employé a été indiqué précédemment; j'y ai apporté quelques perfectionnements. En particulier, la tension utilisée a été sinusoïdale au lieu d'être linéaire. J'ai rendu plus précis le fonctionnement du commutateur de charge et de décharge. Enfin,

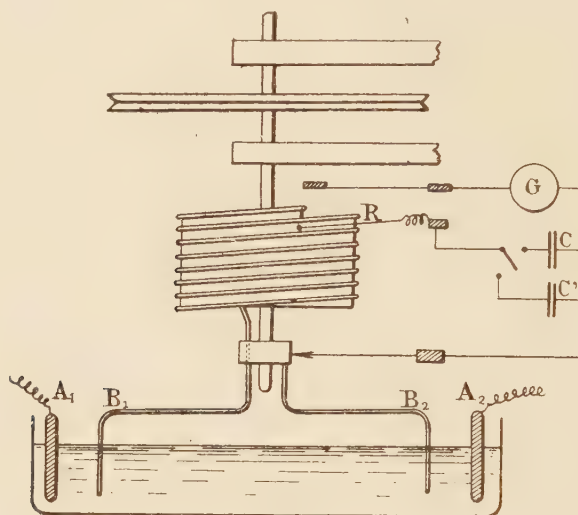


Fig. 6.

la tension au moment de la commutation a été déduite de la charge que possédait à cet instant un condensateur parfait; les essais préliminaires m'avaient, en effet, montré que l'on obtenait des résultats médiocres en mesurant à l'électromètre, une fois pour toutes, à l'arrêt, la tension correspondant à chaque position du commutateur, soit par suite des variations locales de conductibilité du liquide, soit à cause de la polarisation des électrodes mobiles.

Voici comment j'opérais pour décharger le condensateur en un point précis de la période et mesurer la tension correspondante.

Une des électrodes B_2 (fig. 6), reste toujours en communication avec l'une des bornes du condensateur C et du balistique G. L'autre aboutit à un gros cylindre fileté calé sur l'arbre et sur

lequel glisse l'extrémité d'un ressort R relié à la borne libre du condensateur. Ce ressort guidé par les filets fait parcourir quelques cycles au condensateur tant qu'il reste en contact avec le cylindre, puis brusquement à la fin du filetage produit la décharge dans le balistique. Pour connaître la valeur de la tension au moment où cesse la charge, il suffit de remplacer le condensateur étudié par un condensateur parfait ; n'ayant pas à ma disposition de condensateur à air d'une capacité suffisante, je l'ai remplacé par des condensateurs au mica ou à la paraffine dure exempts de viscosité. En portant en abscisses l'élongation relative à ces derniers et en ordonnées celles que donne le condensateur étudié, on obtient ainsi un premier point de la courbe de viscosité. Pour en avoir d'autres, il suffit de faire tourner légèrement soit le support du ressort R, soit la cuve à eau acidulée.

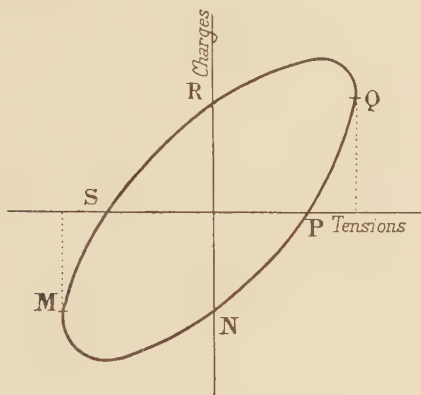


Fig. 7.

B. *Inversion du courant de décharge.* — J'ai déjà insisté sur les difficultés que l'on rencontre pour mesurer la charge d'un condensateur imparfait. Pendant le temps qui sépare le commencement de la décharge du moment du maximum de la première élongation, non seulement la décharge n'est pas complète, mais encore la quantité d'électricité écoulee n'est pas proportionnelle à cette élongation, la théorie élémentaire du balistique étant alors en défaut. Ainsi, pour un balistique choisi sans précautions, l'observation de la première élongation ne peut fournir aucun renseignement précis.

Les mesures sont surtout délicates à interpréter lorsqu'on essaie de déterminer les portions NPQ et RSM du cycle (fig. 7), cor-

respondant à des champs croissants en valeur absolue. Dans ces régions, la décharge change de sens au bout d'un certain temps; il en résulte le plus souvent que le déplacement du spot diminue bien avant le quart de la durée d'une oscillation normale; un observateur non averti peut confondre ces deux phénomènes.

Cette inversion du courant de décharge n'a rien qui doive surprendre, mais elle me paraît intéressante à signaler parce que jusqu'ici on ne l'avait observée que pour des condensateurs soumis à des tensions continues de sens inverse. Comme je l'ai dit, elle existe également pour des tensions sinusoïdales, mais seulement dans le cas où au moment de la décharge la tension a changé de signe depuis moins d'un quart de période; elle ne se produit jamais pour les régions QR et MN qui correspondent à des champs décroissants en valeur absolue.

Pour étudier complètement ce phénomène, il m'a paru utile de mesurer la quantité d'électricité libérée par la décharge pour différentes valeurs de la tension instantanée et pendant des temps variables. J'ai utilisé pour cela un balistique à longue période, muni d'une bobine compensatrice; la quantité d'électricité mise en jeu à un instant quelconque était proportionnelle à l'intensité du courant compensateur, et était relevée 10 s, 20 s, 30 s, 1 mn, 2 mn, 3 mn, après le commencement de la décharge. Dans une dernière série de mesures, un commutateur automatique a été placé sur l'arbre pour limiter la durée de décharge à une seconde; je ne faisais alors pas usage de la bobine compensatrice.

Voici les résultats obtenus (fig. 8) pour un condensateur au papier paraffiné, à la fréquence de 0,33 p.s. Les tensions sont en volts, les charges en microcoulombs.

CONDENSATEUR N° 4. TENSION MAXIMUM, 62 VOLTS						
Tension	+ 8 croît	+ 41 croît	+ 58 croît	+ 52 décr.	+ 33 décr.	+ 7 déc.
Décharge en 1 s	— 7	+ 9	+ 20	+ 27	+ 22	+ 11
» en 10 s	— 18	+ 12	+ 32	+ 45	+ 44	+ 31
» en 20 s	— 34	+ 6	+ 38	+ 61	+ 65	+ 50
» en 30 s	— 48	+ 3	+ 41	+ 72	+ 77	+ 66
» en 1 mn	— 67	— 3	+ 44	+ 88	+ 101	+ 87
» en 2 mn	— 87	— 11	+ 43	+ 100	+ 115	+ 108

C. Déformation du cycle due au mauvais choix du balistique.

— 1° *Balistique dont la durée d'oscillation est insuffisante.* — En possession des résultats précédents, il est possible d'examiner d'une manière plus précise ce qui se passe lorsque l'on utilise un

balistique dont la durée d'oscillation est faible, de quelques secondes par exemple :

Pour un point A à gauche de O la décharge brusque correspondant au pouvoir inducteur spécifique instantané donne une impulsion qui fait dévier le balistique du côté négatif, à gauche pour fixer les idées ; pendant ce déplacement la décharge se con-

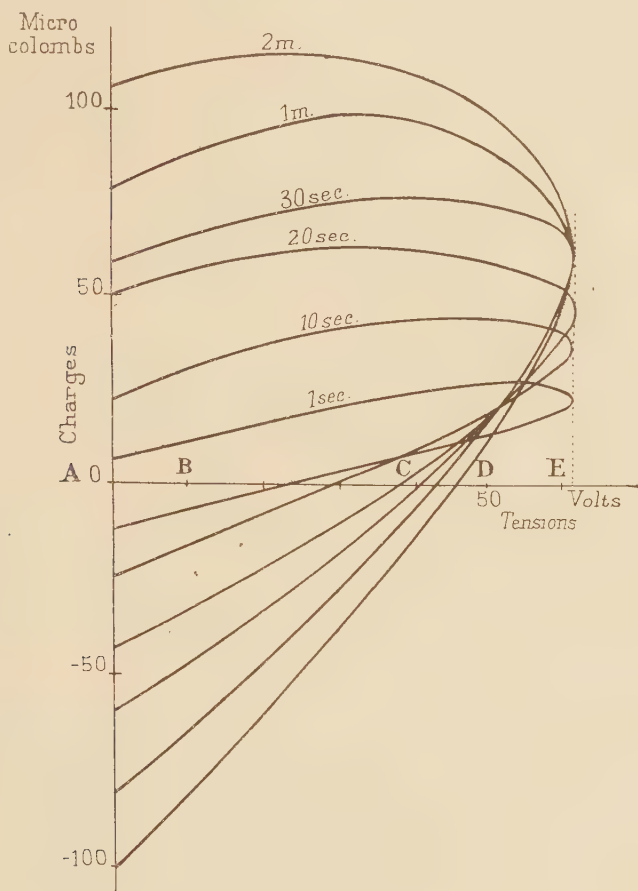


Fig. 8.

tinue et cette action supplémentaire contribue à augmenter la déviation : il arrive pourtant un moment où la torsion du fil devient prépondérante et fait revenir l'équipage mobile vers la droite.

On peut considérer ensuite un point tel que B à droite, mais près du point O. La décharge instantanée donne dans ces conditions une première impulsion vers la droite, mais celle-ci est si faible et si courte qu'elle passe inaperçue ; aussitôt après, en

effet, les résidus se déchargent, poussant l'aiguille vers la gauche, et c'est cette deuxième élongation, celle qui est produite par les résidus, qu'observe l'opérateur.

Au point C, un peu plus loin, la décharge instantanée a augmenté ; d'autre part les résidus les plus rapides sont devenus positifs, de sorte que l'impulsion vers la droite sera sensible. L'observateur verra donc nettement deux élongations, l'une vers la droite, l'autre vers la gauche ; *il ne saura d'ailleurs pas choisir entre les deux.*

Au point D l'élongation vers la droite sera considérable ; son amplitude sera évidemment réduite par l'action des résidus lents qui sont encore négatifs ; pour la même raison sa durée sera probablement inférieure au quart de la période d'oscillation en circuit ouvert. L'observateur n'ayant aucune raison de soupçonner ces anomalies enregistrera cette élongation comme représentant la décharge totale.

Enfin, au point E les résidus rapides sont positifs et intenses ; les résidus lents qui ont pris naissance un quart de période avant, au moment où la tension était sensiblement nulle, ont fort peu d'influence. La décharge s'effectue toujours dans le même sens, le balistique n'en enregistre évidemment qu'une partie assez réduite.

Ainsi lorsque le balistique utilisé a une période d'oscillation insuffisante, une notable partie du résidu n'est pas enregistrée, la surface du cycle de viscosité est considérablement réduite et sa forme même peut être profondément modifiée. On a vu, en effet, que, au voisinage du point B, l'opérateur observe la deuxième élongation, celle qui se produit vers la gauche, tandis qu'au point D, c'est la première, celle qui se produit vers la droite, qu'il enregistre. Suivant le moment où il passe de l'une à l'autre, il déforme plus ou moins la courbe. Le plus souvent, l'observateur ne déterminant le cycle que par quelques points, ne tombe sur aucun point analogue à C ; il joint d'un trait continu les points du cycle correspondant à B et D, de sorte que la figure obtenue présente au voisinage du centre un étranglement (fig. 9). ⁽¹⁾

Pour préciser, j'ai relevé soigneusement dans cette région de la courbe, les deux premières élongations de sens contraire relatives à un condensateur à papier paraffiné. Voici les résultats obtenus :

(1) En particulier il faut chercher là l'explication de l'étranglement de certains cycles que Mercanton constatait sans pouvoir en donner la raison.

Condensateur N° 21. Tension maximum, 75 volts.

Fréquence : 1 période en 3 secondes.

Durée d'oscillation double du balistique : 4 secondes.

Tension (volts)	1 ^{re} élancement (mm)	2 ^{me} élancement (mm)
— 18	»	— 19
— 5	»	— 14
8	0,5	— 13
15	1	— 11
23	2	— 10
29	3	— 9
36	4	— 8
44	6	— 7
54	8	— 5
60	10	— 2
60	15	0
75	25	»

2° *Fluxmètre à pivots*. — Le couple de torsion est, dans cet instrument, pratiquement négligeable, mais les frottements ne sont

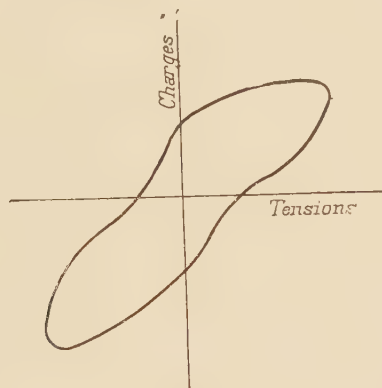


Fig. 9.

pas absolument nuls ; lorsque le couple électromagnétique devient inférieur au couple de frottement, l'équipage mobile s'arrête. Il s'ensuit que le cycle obtenu est surtout déformé aux points pour lesquels la décharge est la plus lente. En particulier, lorsqu'il y a inversion de courant, l'aiguille reste souvent calée lorsque le courant s'annule au lieu de repartir en sens inverse ; le cycle a tendance à devenir rectiligne dans les régions où la tension croît en valeur absolue.

3° *Comparaison expérimentale*. — Pour mettre en évidence l'influence du balistique, j'ai comparé (fig. 10) les cycles obtenus pour un même condensateur à papier paraffiné dans les cas suivants :

Décharge dans un balistique dont la période d'oscillation double était 4 secondes.

Décharge dans un balistique à longue période, muni d'une bobine de compensation.

Décharge dans un fluxmètre.

Décharge d'un condensateur au mica en série avec le condensateur à étudier (méthode dont je m'occuperai plus loin).

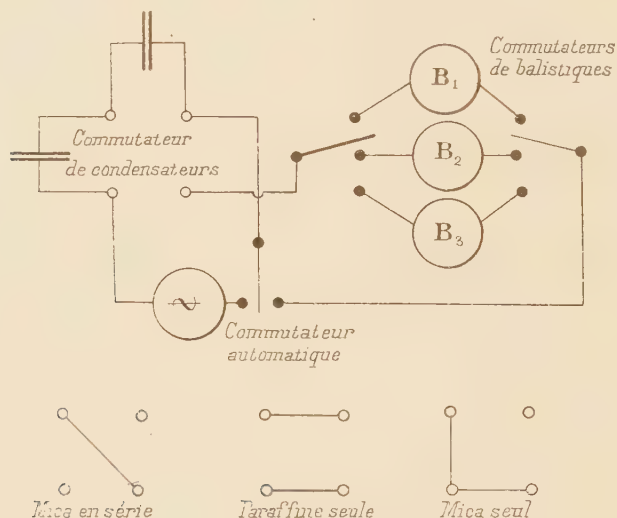


Fig. 10.

Voici les résultats obtenus, les élongations des trois appareils étant ramenés à la même échelle (fig. 11) :

Condensateur N° 18. Tension maximum, 66 volts.

Fréquence : 1 période en 3 secondes.

Tension instantanée (Decharge Mica)	Quantité d'électricité libérée (microcoulombs)		
	Balistique à courte période (1)	Fluxmètre	Balistique compensé
12 croît	1	— 10	— 36
35 croît	3	0	— 24
60 croît	8	14	3
63 décroît	16	23	33
27 décroît	12	26	42
2 décroît	9	16	41

D. *Influence des fuites.* — Il convient enfin de se demander quelle peut être dans cette méthode l'action des fuites ; l'influence de ces dernières peut s'exercer soit entre la charge et la décharge, soit pendant la décharge elle-même.

1° Par suite de l'inertie des pièces en mouvement, la commu-

(¹) La première élongation seule a été prise, même quand elle n'était pas la plus importante.

tation ne peut être instantanée ; pendant qu'elle s'effectue, le condensateur reste isolé et la *tension* entre ses armateurs décroît pour deux raisons : les fuites, la viscosité. La deuxième de ces causes n'a aucune influence sur la *quantité* d'électricité emmagasinée et ne peut modifier que la vitesse de décharge ; la première, au contraire, prélève sur les armatures une partie de la charge qui ne sera plus enregistrée au balistique.

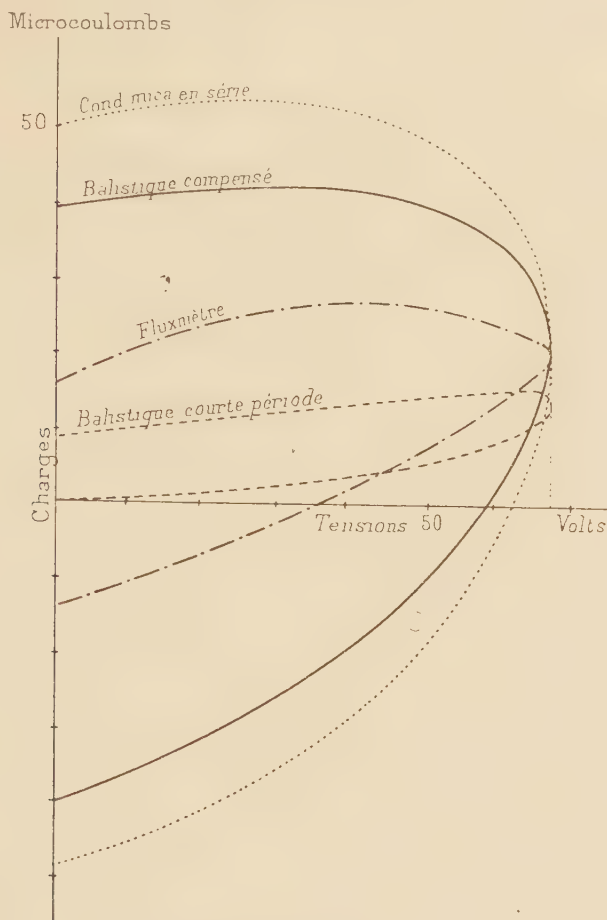


Fig. 11.

Afin de connaître l'influence de cette cause d'erreur, j'ai mesuré, au cours de divers essais, la durée de cette commutation ; elle a toujours été nettement inférieure à $\frac{1}{100}$ de seconde ; il est facile de se rendre compte que, dans ces conditions, l'erreur due aux fuites est négligeable. En nous plaçant dans le cas tout à fait défavorable d'un condensateur de $1 \mu. F$ qui posséderait une résis-

tance de fuites équivalente à 1 mégohm, la charge perdue pendant $\frac{1}{100}$ de seconde ne serait que le $\frac{1}{100}$ de la charge totale, c'est-à-dire de l'ordre de grandeur des erreurs expérimentales.

J'ai voulu préciser la conclusion précédente en construisant certains cycles pour des durées de commutation relativement grandes. Pour la plupart des condensateurs, on ne constate rien d'anormal quand cette durée est inférieure à 1 seconde ; pour quelques-uns, cependant, particulièrement mauvais, l'erreur était déjà sensible, quoique faible pour $\frac{1}{10}$ de seconde.

L'influence de la lenteur de la commutation n'est pas identique pour tous les points du cycle. Elle est proportionnellement plus grande pour les tensions voisines de la tension maximum ; il revient au même de dire qu'elle affecte beaucoup plus la charge instantanée que les résidus. A mesure que la durée de la commutation augmente, les points d'intersection du cycle avec l'axe des tensions s'éloignent du centre, les points d'intersection avec l'axe des charges demeurent sensiblement immobiles.

2° Pendant la décharge, si le balistique a une énorme résistance, la tension aux bornes du condensateur n'est pas nulle, de sorte qu'une partie de la charge passe d'une armature à l'autre à travers les fuites du diélectrique. Si, au contraire, on utilise un balistique muni d'une bobine de compensation, puisque pendant toute la durée de la décharge sa déviation est nulle, c'est que la tension aux bornes de son shunt est rigoureusement nulle. Le condensateur se décharge donc dans un court-circuit absolument franc, de sorte que l'influence des fuites est nulle.

E. Remarque sur l'emploi du mica comme étalon. — Tout ce qui précède suppose que le condensateur au mica est parfait.

Aux fréquences téléphoniques et en haute fréquence, la comparaison directe de condensateurs à air et de petits condensateurs au mica montre que les pertes dans ces derniers sont très faibles.

Mais à très basse fréquence, il pouvait en être autrement, et il était nécessaire de vérifier expérimentalement que l'emploi du mica comme étalon n'introduisait dans les mesures qu'une erreur négligeable ; je ne pouvais évidemment pas le comparer à un condensateur à air, mais il m'était toujours possible de mesurer directement la tension au voltmètre.

Je me suis borné, pour plus de sensibilité, à déterminer l'or-

donnée à l'origine du cycle. Pour cela, le commutateur automatique était d'abord amené exactement au point où se produisait la rupture ; ensuite, je faisais tourner lentement, à la main, la cuve à eau acidulée jusqu'à ce que la tension entre les électrodes mobiles soit nulle, ce que je constatais au moyen du galvanomètre fonctionnant en voltmètre. Le moteur était enfin mis en marche, à une vitesse très lente ; quand la commutation automatique se produisait, j'enregistrais au balistique la décharge correspondant à une tension nulle.

Pour les très faibles vitesses, j'obtenais quelques résidus, mais dans tous les cas, l'ordonnée à l'origine était inférieure au centième de l'ordonnée maximum, ce qui justifie l'emploi du condensateur au mica comme étalon.

III. CYCLE REPRESENTANT LA QUANTITE D'ÉLECTRICITÉ ABSORBÉE. — Les cycles précédents étaient obtenus en portant en ordonnées les quantités d'électricité *emmagasinées* par le condensateur à la charge et *restituées* à la décharge.

On peut construire d'autres cycles qui ne représentent plus la viscosité, mais qui n'en sont pas moins très intéressants ; on les obtient en portant en ordonnées les quantités d'électricité *absorbées* à la charge, qu'elles soient ou non complètement restituées à la décharge.

Ces deux cycles sont forcément identiques, lorsque les fuites sont nulles ; lorsqu'elles ne le sont pas, on peut passer de l'un à l'autre si l'on a mesuré la résistance en courant continu.

La quantité d'électricité absorbée peut être mesurée expérimentalement par l'une des méthodes suivantes :

Décharge d'un condensateur parfait en série avec le condensateur étudié.

Oscillographe.

Contacts tournants.

A. *Décharge d'un condensateur parfait en série avec le condensateur étudié.* — J'ai montré précédemment que la lenteur de la décharge rend les lectures au balistique longues et pénibles.

Il est donc intéressant de pouvoir remplacer la décharge *lente* du condensateur imparfait par la décharge *rapide* d'un condensateur parfait qui possède la même charge ; on arrive facilement à ce résultat en chargeant le condensateur étudié en série avec un condensateur au mica et en déchargeant ce dernier dans le balistique.

Si la capacité du condensateur au mica est grande par rapport à celle de l'autre condensateur, on peut admettre que la tension aux bornes de ce dernier est égale à la tension totale ; sinon, on la calcule par différence. Voici comment on opère :

On charge d'abord les deux condensateurs en série et l'on décharge le condensateur à mica dans le balistique ; l'élongation α ainsi obtenue est proportionnelle à la fois à la tension entre les armatures du condensateur parfait et à la charge commune. On court-circuite ensuite le condensateur imparfait, de manière à charger le condensateur au mica seul, puis on le décharge dans le balistique ; l'élongation β obtenue mesure la tension totale. La tension aux bornes du condensateur imparfait étant représentée par $\beta - \alpha$ il suffit pour obtenir le cycle de viscosité à une échelle arbitraire de porter en abscisses $\beta - \alpha$ et en ordonnées α .

Dans cette méthode, il n'y a plus à craindre que la durée d'oscillation du balistique soit trop faible ; quelle que soit celle-ci, les résultats trouvés sont identiques. Mais en plus du courant de polarisation, on enregistre les fuites. Il ne faut pourtant pas exagérer l'importance de ces dernières ; sauf pour des fréquences très basses, leur influence est faible. J'ai comparé précédemment les résultats obtenus par cette méthode et par la décharge directe du condensateur imparfait ; les cycles ne sont pas très différents ; ils sont beaucoup moins déformés que ceux que l'on obtient avec un balistique de période trop courte.

B. *Emploi de l'oscillographe.* — Au lieu de mesurer les charges, l'oscillographe indique les intensités ; cela revient évidemment au même. Dans le cas le plus général pour construire un cycle avec cet appareil, on enregistre sur un même graphique les courants qui traversent le condensateur à étudier et une résistance connue. De la première par une intégration graphique on déduit aisément à chaque instant de la période la charge absorbée par le condensateur ; de la deuxième on déduit immédiatement la tension correspondante et l'on peut tracer le cycle. On peut évidemment remplacer la résistance étalon par un condensateur parfait, mais cela conduit à une deuxième intégration.

Dans le cas particulier où la tension est sinusoïdale, et dans ce cas seulement, on peut se dispenser de ces intégrations longues et peu précises. L'intensité est évidemment sinusoïdale dans le condensateur parfait ; l'expérience montre qu'elle l'est également dans le condensateur à étudier. Il suffit donc pour obtenir le cy-

cle de porter en abscisses l'intensité du courant dans le condensateur parfait, et en ordonnées l'intensité dans le condensateur à étudier.

L'emploi d'un oscillographe n'est pas toujours possible. En principe, cet appareil possède, en effet, un amortissement très fort et un moment d'inertie faible. Dans ces conditions, sa sensibilité est bien inférieure à celle des galvanomètres ordinaires, de sorte qu'on ne peut que difficilement enregistrer les courants de charge des condensateurs.

L'oscillographe est surtout utile à basse fréquence, car on peut alors donner à son équipement mobile un nombre de spires suffisant sans que sa durée d'oscillation soit comparable à la période de la tension d'alimentation. Naturellement, la résistance de l'appareil doit rester suffisamment faible pour ne pas introduire de déphasage supplémentaire.

J'ai employé la méthode oscillographique à très basse fréquence ; dans ces conditions, je pouvais utiliser un galvanomètre de type courant.

La durée d'oscillation du galvanomètre pouvait être :

1° Relativement très courte, et alors la déviation était proportionnelle à l'intensité ;

2° Ou relativement très longue, et dans ce cas l'appareil fonctionnant en fluxmètre, la déviation était proportionnelle à la charge.

Par contre, si la durée d'oscillation du galvanomètre utilisé avait été du même ordre de grandeur que la période du courant d'alimentation, il se serait produit des battements, la déviation n'aurait plus été sinusoïdale et aucune mesure n'aurait été possible.

Les choix entre les deux solutions précédentes dépend surtout des appareils dont on dispose, et des fréquences utilisées ; il est également influencé par la qualité des condensateurs à essayer. Pour de bons condensateurs, la déviation est, en effet, en raison inverse de la fréquence dans le premier cas, et constante dans le deuxième ; pour de mauvais condensateurs, elle est presque constante dans le premier cas, et sensiblement proportionnelle à la fréquence dans le deuxième. Il faut évidemment tenir compte de ce fait si l'on veut avoir pour différentes fréquences des déviations convenables.

J'ai observé directement la déviation du galvanomètre pour les

fréquences extrêmement basses ; dans les autres cas, j'ai employé une méthode de zéro. Le réglage et l'étalonnage étaient faits sur une résistance de 200 000 ohms.

C. *Emploi de contacts tournants.* — Lorsque l'oscillographe lui-même ne peut être employé, on lui substitue des contacts tournants. Mais ces appareils ne permettent de faire de bonnes mesures que si leur fonctionnement mécanique est parfait ; or, il en est rarement ainsi ; il se produit, au moment où le contact commence, par suite de la largeur des balais, des irrégularités de la partie fixe ou des vibrations, une courte période d'indétermination qui fait que le contact n'a pas toujours la durée voulue ; on ne peut remédier à cet inconvénient qu'en donnant au contact une durée suffisamment longue devant laquelle celle de l'établissement du contact est négligeable ou encore en adoptant un

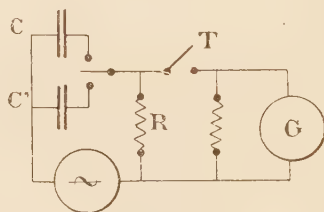


Fig. 12.

appareil de mesure dont les indications sont indépendantes de la durée du contact.,

1° Pour ces raisons, je n'ai pu enregistrer correctement, au moyen d'un galvanomètre et d'un contact instantané, l'intensité du courant dans le condensateur ; la déviation, qui était proportionnelle à la durée du contact était trop fortement influencée par ses variations. En opérant sur la *quantité d'électricité*, j'ai obtenu de meilleurs résultats.

Le courant de l'alternateur (fig. 12) traverse successivement le condensateur C à étudier et une faible résistance R. Le contact tournant T met en dérivation sur R pendant une demi-période le galvanomètre G convenablement shunté. Il est facile de voir que celui-ci prend une déviation permanente proportionnelle à la quantité d'électricité qui a passé dans le condensateur à un certain moment qui dépend de la position du balai. En faisant varier celle-ci et en comparant chaque fois la déviation à celle que donne dans les mêmes conditions un condensateur parfait, on

peut facilement tracer le cycle. Cette méthode est bien plus sensible que la décharge directe au balistique ; la quantité d'électricité qui passe dans l'appareil de mesure est bien plus importante, d'autant plus que la fréquence est elle-même plus élevée.

2° On peut utiliser également une méthode de contact instantanée, mais alors il faut remplacer le galvanomètre par un appareil dont les indications sont indépendantes de la durée du contact, un électromètre par exemple (fig. 13).

On charge en série le condensateur à étudier et un condensateur parfait. Un contact tournant A met en communication avec

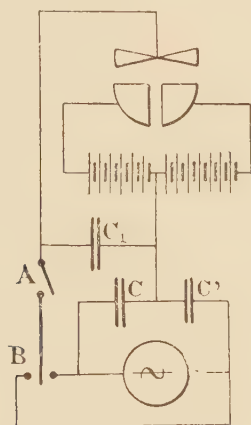


Fig. 13.

un électromètre pendant un temps très court, toujours au même instant de la période l'un quelconque des condensateurs, suivant la position d'un commutateur à main B ; on mesure ainsi tantôt la tension aux bornes du condensateur à étudier, tantôt celle qui existe aux bornes du condensateur parfait. Cette dernière étant proportionnelle à la charge commune, il suffit, pour avoir un point de la courbe, de lire les indications de l'électromètre avant, et après avoir manœuvré le commutateur à main ; pour avoir d'autres points de la courbe on agit sur la position du contact tournant. Si l'on opère à une fréquence relativement faible, il est quelquefois utile d'augmenter la capacité de l'aiguille par un petit condensateur auxiliaire C_1 pour que la déviation reste constante pendant la durée d'un tour, malgré de petits défauts d'isolement.

La sensibilité de cette méthode est théoriquement sans limites, puisque c'est simplement le rapport de deux tensions que l'on mesure ; il suffit de prendre une capacité étalon suffisamment petite, ce qui est toujours possible. Il faut pourtant faire attention que, pour des capacités très petites, de l'ordre du millième de microfarad, la capacité de l'alternateur, des accumulateurs et des connexions par rapport à la terre peut fausser les résultats ; il faut prendre quelques précautions et en particulier il est préférable d'adopter pour l'électromètre le montage idios-tatique.

Cette méthode m'a rendu certains services à tension élevée ; le claquage accidentel des condensateurs étudiés ramenait simplement l'appareil au zéro ; avec les autres méthodes, il aurait causé d'importants dégâts.

3. Les méthodes de l'oscillographe et des contacts tournants doivent donner des résultats identiques à ceux que l'on obtient en déchargeant dans un balistique un condensateur parfait en série avec le condensateur à étudier ; elles sont influencées de la même manière par les fuites. Mais la méthode du balistique présente un inconvénient qui peut devenir grave : elle soumet le condensateur étudié à un régime discontinu composé de cycles sous tension sinusoïdale séparés par des intervalles de court-circuit ; on peut craindre qu'au moment de la décharge, la courbe de viscosité n'ait pas encore atteint sa forme définitive.

IV. UTILISATION DES CYCLES. — On a déjà vu comment on pouvait déterminer le cycle de viscosité ; il reste maintenant à en déduire la capacité et la puissance absorbée.

Avant d'aller plus loin, il est indispensable pour pouvoir parler d'une manière précise, de définir ce que l'on entend par capacité et par pertes.

A. *Capacité*. — La capacité d'un condensateur parfait ne peut se définir que d'une seule manière ; c'est le rapport constant qui existe entre sa charge et la tension à ses bornes. Pour un condensateur imparfait sans fuites, au contraire, on peut distinguer plusieurs sortes de capacités (fig. 11).

1° Un condensateur imparfait mis sous une tension constante U pendant un temps extrêmement court, prend une charge bien définie Q_1 . On peut donner au rapport $\frac{Q_1}{U}$ le nom de « capacité ins-

tantanée » (1). On arriverait à la même définition en considérant la charge libérée pendant une décharge extrêmement courte.

Le même condensateur mis sous une tension constante U pendant un temps extrêmement long emmagasine une charge Q_2 ; le rapport $C = \frac{Q_2}{U}$ est la « capacité maximum ».

2° Enfin, ce condensateur soumis à une tension alternative, sinusoïdale, par exemple, aura emmagasiné à un instant quelconque t une charge q qui ne dépendra pas uniquement de la tension correspondante u . La quantité $\frac{q}{u}$ que l'on pourrait appeler « capacité à l'instant t » prend toutes les valeurs, depuis $-\infty$ jusqu'à $+\infty$, suivant les valeurs de t ; elle n'est pas une caractéristique du condensateur, et l'on est amené en courant alternatif à envisager d'autres définitions.

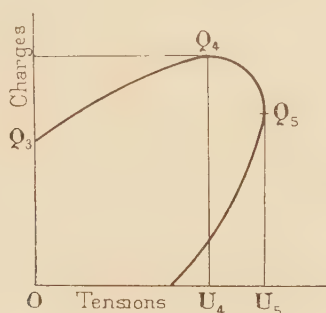


Fig. 14.

On peut à volonté introduire dans celles-ci les coordonnées des points remarquables de la courbe de viscosité : Q_3 charge correspondant à une tension nulle, Q_4 charge maximum, et U_4 tension correspondante, enfin U_5 tension maximum et Q_5 charge correspondante.

Mais une bonne définition doit remplir certaines conditions :

La capacité d'un condensateur imparfait doit : 1° être définie sans ambiguïté ; 2° pouvoir être mesurée d'une manière précise ;

(1) Le mot « instantané » est pris ici dans un sens tout relatif. La théorie électromagnétique de la lumière montre, sans faire aucune hypothèse sur la nature des éléments actifs à l'intérieur du diélectrique, que, pour une même fréquence, le pouvoir inducteur est égal au carré de l'indice de réfraction. On en conclut que, pour des fréquences de plus en plus faibles, le premier ne tend pas vers une limite. Il n'existe pas plus de pouvoir inducteur instantané que d'indice instantané.

3° comprendre comme cas particulier celle d'un condensateur parfait sur la définition de laquelle tout le monde est d'accord.

La première condition oblige à employer comme appareil de mesure fondamental le balistique ; c'est, en effet, la seule méthode dont les résultats peuvent être interprétés sans aucune hypothèse sur la constitution intime des diélectriques, et sont variables même si ceux-ci possèdent des fuites.

La deuxième condition oblige à éliminer de la définition les valeurs Q_5 et U_4 qui sont très mal connues expérimentalement.

Enfin, la troisième condition empêche de se servir de Q_3 qui devient nul dans le cas d'un condensateur parfait.

Je m'arrêterai donc à la définition suivante :

La capacité en courant alternatif est le rapport $\frac{Q_1}{U_5}$ de la charge maximum à la tension maximum.

Accessoirement je considérerai les rapports $\frac{Q_3}{U_5}$ et $\frac{Q_5}{U_5}$ qui sont les composantes actives et réactives de la capacité ainsi définie. On verra, d'ailleurs, que moyennant certaines hypothèses d'autres méthodes de mesure (pont, etc.) donnent le rapport $\frac{Q_1}{U_1}$.

B. Pertes. — Il faut également préciser la définition des pertes.

1° Dans un condensateur *parfait avec fuites*, le courant de capacité se compose avec le courant de conduction ; la résultante est déphasée par rapport à la tension. On doit considérer un « déphasage dû aux fuites ».

2° Dans un condensateur *imparfait sans fuites*, il se produit des pertes par viscosité, et l'intensité n'est plus en quadrature avec la tension. On a à considérer un autre « déphasage dû à la viscosité. »

3° Dans un condensateur *imparfait avec fuites*, ces deux sortes de pertes coexistent. On doit donc considérer un « déphasage total ».

Il faut bien faire attention quand on compare les résultats de plusieurs méthodes, que les unes nous donnent le déphasage total, les autres seulement le déphasage dû à la viscosité.

Après avoir défini ainsi les déphasages φ du courant sur la tension, on peut considérer les déphasages α de la quantité d'électricité sur la tension ; ces angles α auxquels on donne le nom d'angles de pertes sont complémentaires des angles φ .

C. *Décharge directe au balistique.* — Un condensateur imparfait sans fuites traversé par un courant sinusoïdal, dont l'intensité efficace est I ampères, déphasé d'un angle φ sur une tension sinusoïdale dont la valeur efficace est U volts, absorbe une puissance de $UI \cos \varphi$ watts.

Je puis introduire dans cette expression la charge efficace Q .

Comme l'intensité instantanée est la dérivée de la charge instantanée, le rapport entre leurs valeurs efficaces est égal à la pulsation ω .

$$I = Q \omega.$$

Au lieu du déphasage φ de l'intensité, je fais apparaître le déphasage α de la charge sur la tension. La puissance absorbée devient :

$$U Q \omega \sin \alpha.$$

En mettant en évidence la capacité C définie précédemment l'expression de la puissance devient :

$$U^2 C \omega \sin \alpha \text{ watts.}$$

Enfin, les pertes que l'on aurait obtenues en opérant sous une tension efficace de 1 volt ont pour valeur :

$$P_a = \omega C \sin \alpha \text{ watts.}$$

A côté de cette puissance active P_a transformée en chaleur, on peut considérer la puissance réactive P_r restituée par le condensateur ; on obtient de la même manière :

$$P_r = \omega C \cos \alpha \text{ watts.}$$

Les valeurs de $C \sin \alpha$ et de $C \cos \alpha$ se déduisent immédiatement du tracé du cycle. Elles sont égales à :

$$C \sin \alpha = \frac{Q_3}{U_5}, \quad C \cos \alpha = \frac{Q_5}{U_5}.$$

Le calcul précédent a été fait dans le cas où la conductance de fuites du condensateur est nulle. S'il n'en est pas ainsi, les résultats sont quand même entièrement valables, le balistique n'étant pas influencé par les fuites. La puissance *perdue par viscosité* est encore donnée par la même formule.

D. *Décharge d'un condensateur parfait en série. Oscillographe. Contact tournant.* — La méthode précédente est la seule qui puisse donner d'une manière sûre les pertes *par viscosité* et la capacité telle que je l'ai définie. Toutes les autres nécessitent des hypothèses supplémentaires. Dans celle-là, nous avons seulement supposé que le courant sous tension sinusoïdale restait sinu-

soïdal ; dans celles-ci, nous serons obligés de faire une correction plus ou moins délicate relative aux fuites.

La décharge dans un balistique d'un condensateur parfait en série avec le condensateur à étudier, l'oscillographe, les contacts tournants et toutes les méthodes qui en dérivent ne permettent, en effet, de mesurer que la charge qui est absorbée par le condensateur et non celle qui est récupérable. Une conséquence immédiate est qu'elles font connaître la perte d'énergie totale, tant par effet Joule proprement dit que par viscosité. On peut bien, il est vrai, déduire l'effet Joule de la résistance mesurée en courant continu, mais j'ai montré combien il faut être prudent dans ces mesures et quelles incertitudes on obtient sur le résultat final.

En outre, si ces méthodes font connaître d'une manière très sa-

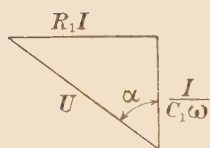


Fig. 15.

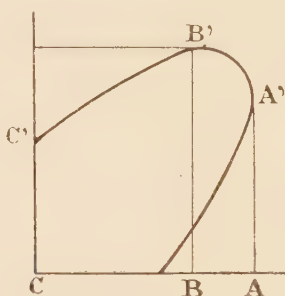


Fig. 16.

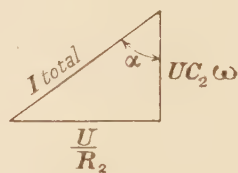


Fig. 17.

tisfaisante la perte totale, quantité souvent intéressante, elles renseignent beaucoup moins bien sur la capacité. On peut montrer, en effet, qu'un cycle donné n'est pas caractéristique d'un condensateur possédant à la fois de la viscosité et des fuites.

Ce que l'on connaît sans ambiguïté, c'est, d'une part, la puissance active proportionnelle à $C \sin \alpha$; d'autre part, la puissance réactive proportionnelle à $C \cos \alpha$. Or, cette dernière ne permet de calculer la capacité que si l'on connaît sous quelle tension cette puissance est emmagasinée, ce qui n'est pas le cas. On peut le montrer par un exemple simple.

On associe d'abord en série (fig. 15) un condensateur parfait C_1 et une résistance R_1 . Cet ensemble, dans des conditions de fréquence et de tension bien déterminées, donne un certain cycle $A'B'C'$ (fig. 16) et l'angle de perte est donné par la relation :

$$\operatorname{tg} \alpha = R_1 C_1 \omega.$$

Or, quand la tension est CB l'intensité est nulle et la tension aux bornes du condensateur est égale à la tension totale, de sorte que

le rapport $\frac{BB'}{CB}$ est égal à C_1 . En appelant C la capacité telle que je l'ai définie, on a donc $C_1 = \frac{C}{\cos \alpha}$.

On associe ensuite en dérivation un condensateur parfait C_2 et une résistance R_2 (fig. 17) de manière à obtenir le même cycle. On a $\tan \alpha = \frac{1}{R_2 C_2 \omega}$ et la capacité C_2 est maintenant égale à $\frac{AA'}{CA}$, ce qui donne $C_2 = C \cos \alpha$.

Ainsi on obtient un même cycle avec deux capacités C_1 et C_2 bien différentes. Quand on opère sur un condensateur imparfait le tracé du cycle n'est donc pas suffisant pour déterminer sa capacité ; on doit faire des hypothèses sur la constitution de son diélectrique, l'assimiler par exemple à un ensemble de condensateurs et de résistances disposés un peu arbitrairement. L'expérience seule peut montrer si ces hypothèses sont légitimes.

Ce qui précède montre pourtant que si l'angle de pertes est très faible, les valeurs

$$C_1 = \frac{C}{\cos \alpha} \text{ et } C_2 = C \cos \alpha$$

sont peu différentes de la valeur C mesurée au balistique. On peut donc utiliser ces diverses méthodes, dans des conditions normales de fréquence et de température, mais il ne faut accepter qu'avec précaution les résultats qu'elles donnent à très basse fréquence ou à température un peu élevée.

CHAPITRE III

MESURE DIRECTE DE LA CAPACITE ET DES PERTES

Dans le chapitre précédent, j'ai indiqué comment on pouvait, une fois les cycles de viscosité obtenus, en déduire la capacité et les pertes. Je dois étudier maintenant d'autres méthodes qui permettent d'arriver au même résultat sans nécessiter le tracé du cycle.

I. MÉTHODE CALORIMÉTRIQUE. — A. *Historique*. — Les mesures calorimétriques furent les premières en date. Dès 1861, Siemens ⁽¹⁾ constata l'échauffement des bouteilles de Leyde, mais les expériences systématiques ne commencèrent guère qu'une vingtaine

(1) SIEMENS. *Monatsbericht Berliner Akademie*, oct. 1861.

d'années plus tard avec Naccari et Bellati ⁽¹⁾. Leurs travaux furent repris par Kleiner ⁽²⁾ et surtout par un de ses élèves, Duggelin ⁽³⁾ qui étudia un grand nombre de substances.

Ces études, faites à une époque où les moyens d'investigation étaient médiocres, n'ont pu donner que des résultats qualitatifs ; il serait sans intérêt d'en faire ici une critique détaillée. Je me bornerai à donner le principe de la méthode de Duggelin pour montrer dans quelles conditions défectueuses se faisaient les expériences.

Le condensateur étudié est mis en série avec un autre beaucoup plus grand ; aux bornes de chacun d'eux, se trouve un éclateur muni d'un micromètre. On alimente le tout par une machine statique, en s'arrangeant pour que le nombre d'étincelles éclatant par seconde aux bornes du grand condensateur soit assez petit pour pouvoir être compté. Connaissant le rapport des deux capacités, on en déduit le nombre de charges et de décharges du condensateur étudié ; la tension est déduite de l'écartement des micromètres ; l'échauffement est mesuré avec une pince thermo-électrique.

Les critiques que l'on peut adresser à ce montage sont nombreuses. En premier lieu, le condensateur étudié est soumis à une série de charges et de décharges oscillantes et par suite à des oscillations de fréquence bien plus élevée que celle qu'on déduit du rapport des capacités et du nombre d'étincelles. En second lieu, ce rapport n'a pas de sens précis, puisqu'un condensateur imparfait n'a pas une capacité bien définie. Enfin, la mesure de la tension est grossière et les soudures thermoélectriques, mal protégées contre le refroidissement dans ces expériences, ne peuvent donner une valeur précise de l'échauffement. Aussi, les résultats obtenus semblent inexacts ; en particulier, ils indiquaient que les pertes sont simplement proportionnelles à la tension.

Peu à peu, les méthodes de mesure devinrent plus précises. Les principaux perfectionnements successifs furent les suivants :

Utilisation d'un calorimètre au lieu d'une pince thermoélectrique (Fritz) ⁽⁴⁾.

⁽¹⁾ NACCARI ET BELLATI. *Atti di Torino*, t. XVII, 1882.

⁽²⁾ KLEINER. *Vierteljahrschrift Zürich*, t. XXXVII, 1893.

⁽³⁾ DUGGELIN. *Vierteljahrschrift Zürich*, t. XXXIX, 1895.

⁽⁴⁾ FRITZ. *Ueber Warmetonung bei electrischer Polarisation des Glases* Thèse. Zurich, 1893.

Remplacement d'une machine statique par une bobine d'induction (Benischke, Houllévigüe) ⁽¹⁾.

Emploi de tensions sinusoïdales qui soumettent le condensateur à un régime plus régulier et sont mesurables avec plus de précision (Rosa et Schmidt) ⁽²⁾.

Enfin, tout récemment, M. Bouzon a réussi à obtenir un échauffement notable avec une quantité très restreinte de diélectrique en employant des ondes entretenues de fréquence très élevée émises par une lampe à 3 électrodes.

B. *Avantages.* — Les méthodes calorimétriques sont précieuses lorsqu'on doit comparer des mesures faites à des fréquences très différentes. Alors que dans la plupart des autres méthodes, on doit tenir compte avec plus ou moins d'exactitude de perturbations variables avec la fréquence (imperfections des condensateurs étalons, des résistances, capacités parasites, etc.), les erreurs systématiques que l'on pourrait commettre dans les mesures calorifiques ont été étudiées depuis longtemps ; si la sensibilité est limitée, on peut, par contre, être *absolument sûr* de l'approximation obtenue.

C. *Mesure de la quantité de chaleur.* — Les condensateurs employés dans mes essais à haute fréquence sont constitués de la manière suivante : un tube de laiton étamé est recouvert du diélectrique à étudier, puis de papier d'étain ; sur celui-ci est bobinée une couche de fil isolé d'une résistance de quelques ohms. Enfin, le tout est enveloppé dans une étoffe de soie bien sèche, placé dans un tube à double paroi, genre Dewar, qui s'oppose au refroidissement et mis à l'abri du rayonnement des lampes.

Le thermomètre, sensible au $\frac{1}{100^{\circ}}$ de degré, est placé à l'intérieur du tube ⁽³⁾ ; l'expérience montre qu'il est nécessaire de remplir celui-ci à moitié d'eau ou de pétrole pour régulariser la température et assurer le transport de la chaleur au thermomètre.

D. *Étalonnage.* — La puissance dégagée dans le condensateur

⁽¹⁾ BENISCHKE. *Elekt. Zeitschrift*, 1895.

HOULLEVIGUE. *Journal de Physique théorique et appliquée*, 1897, 3^e Série, t. VIII, p. 113.

⁽²⁾ ROSA ET SCHMIDT. *Physical Review*, 1899, t. VIII, p. 1.

⁽³⁾ Dans cette position, le thermomètre est soustrait à l'action de tout champ électrique. Au cours d'essais effectués sur un condensateur plan, où le thermomètre était placé entre les lames, j'ai constaté des échauffements tout à fait anormaux ; dans ces conditions, à cause de la présence du mercure, le champ à l'intérieur du verre du thermomètre était extrêmement intense et, de ce fait, il s'y produisait des pertes notables.

est proportionnelle à l'échauffement par unité de temps. Il m'a paru illusoire de calculer le coefficient de proportionnalité au moyen des chaleurs spécifiques de chacun des constituants ; il aurait été plus précis de mesurer directement la chaleur spécifique moyenne de l'ensemble en ajoutant une certaine quantité d'eau chaude dans le tube.

Afin de me mettre complètement à l'abri des erreurs dues au rayonnement, j'ai préféré que, pour l'étalonnage et pour les essais en alternatif, le dégagement de chaleur ait lieu *au même endroit et pendant le même temps*.

Pour cela, je mettais l'enroulement auxiliaire en communication avec un accumulateur, par l'intermédiaire d'un rhéostat. Je lisais, à l'ampèremètre et au voltmètre, le courant i absorbé sous la tension u , puis, au bout de 5 minutes par exemple, je coupais le courant ; quelques secondes après, le thermomètre s'arrêtait, indiquant un échauffement δt . Si, pendant l'essai en alternatif, qui durait également 5 minutes, sous la tension efficace U et avec l'intensité I , j'obtenais un échauffement Δt peu différent de δt , je pouvais en déduire pour l'angle de perte :

$$\sin \alpha = \frac{u}{U} \times \frac{i}{I} \times \frac{\Delta t}{\delta t}.$$

E. *Appareils de mesures électriques.* — La méthode calorimétrique m'ayant servi pour étudier les pertes dans les diélectriques entre 1 000 et 300 000 p:s environ, j'ai dû mesurer des courants très différents.

Pour les intensités les plus faibles, j'utilisais un thermocouple fer-constantan, d'une résistance de 18 ohms, formé de deux fils fins croisés et placés dans le vide ; deux extrémités voisines étaient reliées au circuit oscillant, les deux autres à un galvanomètre sensible à courant continu.

Pour des intensités supérieures, je ne pouvais songer à shunter le thermocouple, car le facteur de réduction aurait été fonction de la fréquence ; je ne touchais donc rien *du côté alternatif*, mais je mettais *du côté continu* une résistance en série avec le galvanomètre, pour réduire sa déviation.

Au delà de 10 milliampères, de peur que la température de ce thermocouple ne devînt excessive pour sa bonne conservation, je le remplaçais par un autre de 2 ohms. Enfin, à partir de 35 milliampères, j'employais un ampèremètre thermique sensible.

Je n'ai pu étalonner mes thermocouples sur du courant continu

qu'avec une approximation insuffisante. En courant alternatif, la déviation ne dépend que de l'effet Joule proportionnel au carré du courant ; en courant continu, il s'y superpose un effet Peltier réversible, simplement proportionnel au courant et changeant de sens avec lui. Théoriquement donc, au moyen de deux mesures faites en courant continu, j'aurais pu éliminer l'effet Peltier ; pratiquement, pour les faibles intensités que j'utilisais, il était nettement prépondérant et je n'obtenais par différence que des résultats un peu incertains.

J'ai donc effectué l'étalonnage en courant alternatif, à 900 p.s, par comparaison avec l'ampèremètre thermique préalablement étudié au potentiomètre. Le thermocouple était mis en série avec un condensateur de $0,01 \mu F$, le thermique avec un condensateur de $0,2 \mu F$, et l'ensemble était connecté à une bobine couplée par induction avec un circuit excitateur à 900 p.s. En faisant varier le couplage, j'obtenais différentes intensités au thermique ; je divisais par 20 pour avoir celles qui traversaient le thermocouple (la correction nécessitée par les résistances du thermocouple et du thermique est inférieure au millième). La courbe d'étalonnage obtenue était d'allure parabolique, les déviations étant sensiblement proportionnelles aux carrés des intensités alternatives.

La position relative de l'électromètre et de l'ampèremètre n'est pas indifférente. La capacité du premier, variable d'ailleurs avec la tension, n'est pas négligeable devant celle du condensateur ; pour le multicellulaire que j'utilisais le plus souvent, elle atteignait $0,05 m \mu F$ sous la tension maximum. La résistance de l'ampèremètre est de 20 ohms environ, de sorte que la chute de tension pour 0,1 ampère est de 2 volts, mais sensiblement en quadrature avec la tension totale. C'est donc le montage indiqué sur la figure 2 qu'il convient d'adopter.

II. MÉTHODE WATTMÉTRIQUE. — La méthode du wattmètre a été utilisée la première fois par Steinmetz ⁽¹⁾ en 1892, pour des condensateurs au papier paraffiné de grande capacité. Elle a été étendue depuis à des capacités beaucoup plus faibles (Swingedaew, Rennesson, Frigon) ⁽²⁾.

⁽¹⁾ STEINMETZ. *Electrical Engineer*, 1892, p. 272.

⁽²⁾ SWINGEDAUW. *Comptes-rendus de l'Académie des Sciences*, 1919, t. CLXVIII, p. 231.

RENNESSON. *Revue générale de l'Electricité*, t. VII, p. 579, 1920.

FRIGON. *Bulletin de la Société française des Electriciens*, 4^e Série, tome II, août 1922.

A. Ce qui rend délicat la mise en œuvre de ces dernières mesures, c'est que l'on demande au wattmètre deux qualités difficilement compatibles : être d'une grande sensibilité et n'introduire aucun déphasage supplémentaire. Il faut, pour obtenir ce résultat dans les wattmètres électrodynamiques, donner au fil de suspension un couple de torsion extrêmement faible, ce qui permet de réduire également le couple électrodynamique en donnant aux bobines un nombre de spires relativement peu important ; on peut alors mettre en série avec le circuit à fil fin une très grande résistance et donner au circuit à gros fil une résistance et une inductance négligeables.

B. Il est commode pour les hautes tensions (Skinner) ⁽¹⁾ de remplacer le wattmètre électrodynamique par un wattmètre électrostatique. Le fonctionnement de cet appareil est simple, surtout si l'on opère sur un électromètre du type Blondot et Curie (fig. 18).

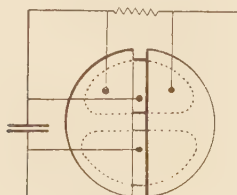


Fig. 18.

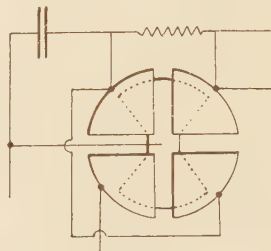


Fig. 19.

Le couple électrostatique instantané est proportionnel à la tension entre les secteurs mobiles et à la tension entre les quadrants fixes. Pour que la déviation moyenne soit proportionnelle à la puissance, il faut que l'une de ces tensions soit proportionnelle au courant, l'autre à la tension aux bornes de l'appareil d'utilisation. Il suffit pour cela de relier les secteurs mobiles aux bornes du condensateur et les quadrants fixes aux extrémités d'une résistance mise en série avec lui.

Si l'on emploie un électromètre ordinaire (fig. 19), il faut deux mesures pour connaître la puissance. La déviation de l'électromètre est maintenant proportionnelle à la tension entre les quadrants et à la tension entre l'aiguille et le milieu de la résistance. Il en résulte qu'on mesure, outre la perte dans le condensateur, l'effet Joule dans la moitié de la résistance ; pour éliminer cette der-

⁽¹⁾ SKINNER. *Journal of the Franklin Institute*, juin 1917, t. CLXXXIII, p. 667.

nière, on fait une deuxième lecture après avoir relié l'aiguille à l'un des quadrants et on fait la différence.

C. Les indications du wattmètre sont insuffisantes pour renseigner complètement sur le condensateur ; il faut connaître aussi la tension et l'intensité. On peut utiliser pour cela un voltmètre et un ampèremètre. J'ai préféré dans la plupart des essais opérer différemment et mesurer l'une après l'autre les puissances actives et réactives.

Pour cela, j'ai utilisé du courant diphasé. Le condensateur est toujours alimenté par la même phase ; le circuit à fil fin du wattmètre est, au contraire, branché tantôt sur l'une, tantôt sur l'autre. La déviation est proportionnelle dans un cas à $U \sin \alpha$, dans

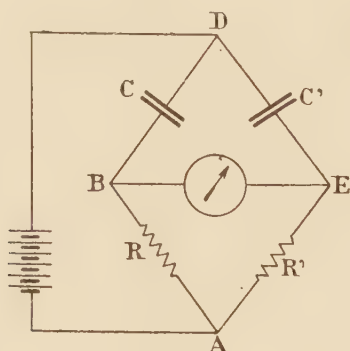


Fig. 20.

l'autre à $U \cos \alpha$. Le rapport entre ces deux quantités est égal à la tangente de l'angle de pertes totales. Quant à la capacité, on la déduit de la puissance réactive absorbée sous cette tension par un condensateur parfait étalon.

III. MÉTHODE DU PONT. THÉORIE. — La méthode du pont est une des plus intéressantes et j'y consacrerai deux paragraphes. Dans l'un, j'exposerai la théorie ; dans l'autre, j'indiquerai les difficultés que soulève sa réalisation pratique.

A. *Pont de Sauty*. — Considérons d'abord (fig. 20) un pont de Wheatstone A B D E formé de deux résistances, deux condensateurs *parfaits* et un téléphone ; alimentons-le par un courant quelconque, continu ou alternatif. Le téléphone restera muet si le courant s'établit suivant la même loi dans les circuits dérivés ABD et AED, ce qui exige que les constantes de temps CR et $C'R'$ soient égales. C'est la méthode classique de Sauty.

B. *Ponts de Wien et de Nernst.* — Imaginons maintenant que l'un des condensateurs C soit imparfait; la différence de potentiel entre B et E ne pourra plus être annulée quelles que soient les valeurs de R et de R' et l'équilibre sera impossible dans le cas le plus général. Mais si on s'est placé dans le cas particulier d'une tension sinusoïdale, on pourra rétablir le silence au téléphone en plaçant en dérivation sur le condensateur parfait (fig. 21) ou en série avec lui (fig. 22), une résistance convenable; on a donc le choix entre deux montages, le premier employé par Nernst, le second par Wien.

Dans chacune de ces dispositions, on obtient, lorsque le télé-

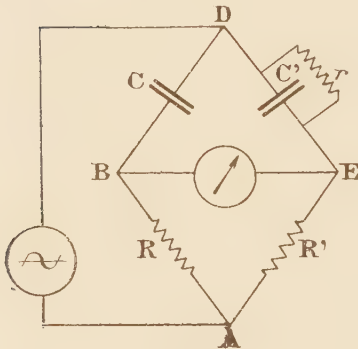


Fig. 21.

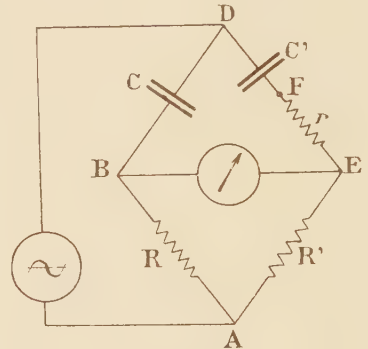


Fig. 22.

phone est muet, deux équations d'équilibre; la première est la relation $CR = C'R'$ comme dans la méthode de Sauty. La seconde indique que l'angle de perte est le même dans les branches BD et ED; en appelant r la résistance supplémentaire ajoutée au condensateur parfait C' l'angle de perte du condensateur imparfait est donné par la formule :

$$\operatorname{tg} \alpha = C'r \omega \text{ (méth. de Wien) ; } \operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{C'r \omega} \text{ (méth. de Nernst)}$$

C. *Comparaison du pont de Wien et du pont de Nernst.* — Il y a lieu de faire ici une remarque qui me paraît fondamentale : les résultats obtenus en déterminant la capacité d'un condensateur imparfait par ces deux méthodes ne peuvent pas, *théoriquement*, être identiques parce qu'ils ne correspondent pas à la même définition.

1° Il est évident, en premier lieu, que les méthodes du pont ne peuvent pas donner pour la capacité le même résultat. Ce

qu'elles fournissent, en effet, sans ambiguïté, ce sont les puissances active et réactive absorbées par le condensateur étudié ; mais lorsque de la valeur de cette dernière, on veut déduire la capacité par les formules indiquées plus haut, on suppose implicitement dans la méthode de Nernst qu'elle est absorbée sous la tension totale DE; dans la méthode de Wien, au contraire, on admet qu'elle est absorbée sous la tension DF qui existe aux bornes du condensateur parfait de comparaison, ce qui est bien différent.

2° Comparons maintenant les capacités obtenues au pont à celle que donne le balistique ; pour simplifier, supposons égaux les bras R et R' du pont.

Considérons d'abord un condensateur C présentant de la *viscosité mais sans fuites*. Dans la méthode de Wien, le condensateur C et le condensateur C' de comparaison emmagasinent la même quantité d'électricité maximum ; mais les tensions maximum auxquelles ils sont soumis ne sont pas égales et leur rapport est $\cos \alpha$. Le rapport entre la capacité définie au balistique et la capacité mesurée au pont est donc $\cos \alpha$.

Dans la méthode de Nernst, le rapport entre les quantités maximum d'électricité qui traversent C et C' est $\frac{1}{\cos \alpha}$, les tensions maxima sont les mêmes pour C et C'; le rapport entre la capacité définie au balistique et la capacité mesurée au pont est donc $\frac{1}{\cos \alpha}$.

Examinons maintenant le cas d'un condensateur *sans viscosité mais avec fuites*.

Dans la méthode de Wien, le rapport entre les quantités d'électricité maximum emmagasinées par C et C' est $\cos \alpha$; le rapport entre les tensions maximum supportées est $\frac{1}{\cos \alpha}$; le rapport des capacités obtenues au balistique et au pont est donc $\cos^2 \alpha$. La méthode de Nernst donnera, par contre, pour la capacité, la même valeur que celle du balistique ; ce dernier appareil n'est pas, en effet, influencé par les fuites.

3° Ainsi, pour des condensateurs *présentant de la viscosité sans fuites ou des fuites sans viscosité*, la capacité obtenue au pont de Wien est toujours $\frac{1}{\cos^2 \alpha}$ fois plus grande qu'au pont de Nernst. Rien n'empêcherait évidemment de compliquer légèrement les

formules adoptées de manière à obtenir au pont, pour de tels condensateurs, des résultats identiques à ceux que donne le balistique. Mais il faut bien remarquer que ces formules ne seraient pas valables pour les condensateurs ordinaires qui possèdent *à la fois de la viscosité et des fuites* ; le pont à courant alternatif est en effet insuffisant pour indiquer dans quelle proportion les pertes sont dues à la viscosité ou aux fuites. L'emploi du courant continu ne peut donner qu'une approximation très grossière dans la mesure des fuites, et c'est pour cela que j'ai adopté précédemment la méthode du balistique pour définir dans le cas le plus général la capacité d'un condensateur.

Dans les conditions ordinaires, $\cos \alpha$ est très voisin de 1, de sorte qu'il n'y a pas grand écart entre les valeurs de la capacité obtenue par les différentes méthodes. Il en serait tout autrement si, dans les conditions de la mesure, les pertes étaient importantes ; on en trouvera plus loin un exemple, en étudiant l'influence de la température.

D. *Influence des harmoniques.* — C'est dans le cas particulier d'une tension sinusoïdale qu'ont été établies les formules :

$$\operatorname{tg} \alpha = C' r \omega \text{ (Wien)} \qquad \operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{C' r \omega} \text{ (Nernst).}$$

Dans le cas d'une tension quelconque, il est impossible d'obtenir le silence au téléphone. Il faudrait, en effet, pour cela que la résistance r fût la même pour tous les harmoniques, ou ce qui revient au même, que $\operatorname{tg} \alpha$ fût proportionnel à la fréquence (Wien) ou variât en raison inverse (Nernst). Or, en première approximation, l'angle de perte est indépendant de la fréquence. Par suite, lorsqu'en procédant à la mesure, on s'approche suffisamment de l'équilibre relatif à la fréquence fondamentale, les harmoniques supérieurs apparaissent brusquement dans le téléphone ; s'ils sont suffisamment intenses, ils enlèvent toute précision au résultat.

On peut remédier en partie à cet inconvénient en employant des appareils de zéro susceptibles d'entrer en résonance *mécanique* (monotéléphones, galvanomètres de résonance), mais la solution réellement efficace consiste à épurer la tension d'alimentation par un nombre suffisant de résonances *électriques*.

E. *Conditions de sensibilité.* — Lorsque l'on se contente de mesurer au pont la *capacité* de bons condensateurs, pour des fréquences normales, l'approximation obtenue est supérieure au

millième, quelles que soient R et R' . Il n'en est pas de même quand on doit déterminer les pertes, car il s'agit alors d'annuler le minimum précédemment obtenu ; si R et R' ne sont pas convenablement choisies, la sensibilité est souvent insuffisante. Essayons de déterminer approximativement dans quelles conditions il faut se placer pour obtenir dans la méthode de Wien l'angle de perte avec le plus de précision.

Prenons comme origine des phases celle de la tension d'alimentation, supposons que l'impédance de l'appareil de zéro est infinie et appelons I et I' les courants dans les deux branches du pont.

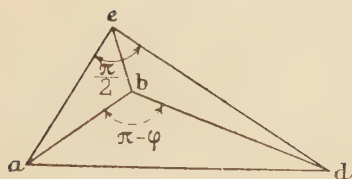


Fig. 23.

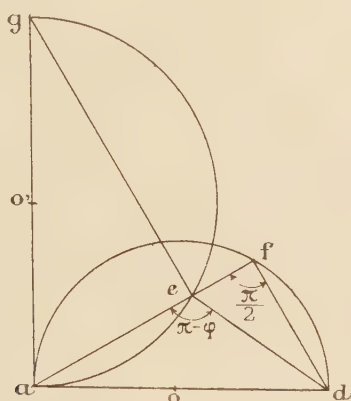


Fig. 24.

La tension aux bornes du condensateur imparfait C est déphasée d'un angle φ sur le courant qui le traverse, tandis que la tension aux bornes de R est en phase avec lui ; si nous représentons (fig. 23) ces quantités par bd^* et ab , l'angle abd sera égal à $\pi - \varphi$. D'un autre côté, si nous supposons momentanément $r = 0$, nous pouvons représenter les tensions aux bornes de C et de R par ed et ae , l'angle aed étant droit. La tension aux bornes de l'appareil de zéro sera représentée en grandeur et en phase par be et l'on voit qu'il est impossible de l'annuler tant que r est nul. Si au contraire r est différent de zéro, on pourra amener e à coïncider avec b par un réglage convenable de r et de $\frac{R}{R'}$.

Voyons comment varie la tension be quand, R étant donné (fig. 24), on fait varier indépendamment R' et r .

1° r étant supposé constant, le déphasage ψ dans le circuit AED

est constant puisque sa tangente est égale à $\frac{1}{C' r \omega}$; l'angle $aed = \pi - \phi$ est constant. Si nous faisons croître R' , l'intensité I' et par suite le vecteur ae diminueront; le point e se rapprochera de a en décrivant le segment capable de l'angle $\pi - \phi$.

2° Donnons maintenant à R' une valeur constante et faisons augmenter r . L'angle $\pi - \phi$ grandira et le point e se déplacera vers des segments capables d'angles plus obtus.

Menons par e la normale eg à ae ; les angles fde et aeg sont égaux comme ayant les côtés perpendiculaires, de sorte que les triangles fde et eag sont semblables. Nous avons donc :

$$\frac{ag}{ad} = \frac{ae}{fd}.$$

Ce dernier rapport peut s'évaluer facilement ; en effet :

$$ae = R' I' \quad fd = \frac{I'}{C' \omega}, \quad \text{donc} \quad ag = ad \times R' C' \omega = C^{te}.$$

Le point e se déplacera donc sur un cercle O' de diamètre ag orthogonal au cercle O .

Le réglage de r sera obtenu avec d'autant plus de précision que la tension be sera plus grande pour un déphasage donné ; il est facile de voir que pour des déphasages pas trop considérables, be sera voisin du maximum quand les cercles O et O' seront égaux, c'est-à-dire pour $R' C' \omega = 1$.

Ceci montre qu'il faut constituer les bras du pont avec des résistances d'autant plus élevées que la fréquence est plus faible. Pour fixer les idées, avec des condensateurs de l'ordre de $1 \mu F$, R et R' doivent être environ de :

100 000 pour les très basses fréquences ($f = 1$ ou 2 p:s);

5 000 pour les fréquences industrielles ($f = 25$ ou 50 p:s);

500 pour les fréquences téléphoniques ($f = 500$ ou $1\,000$ p:s).

Si, par exemple, on n'employait qu'une résistance de 100 ohms pour une fréquence de 20 p:s, le diamètre du cercle O' ne serait que le centième de celui de O , et l'on n'aurait aucune précision.

F. *Appareils de zéro.* — En principe, n'importe quel appareil à courant alternatif peut servir d'appareil de zéro ; on emploie couramment les suivants:

Galvanomètre de résonance. C'est le plus sensible et le plus commode à basse fréquence;

Electrodynamomètre, les deux enroulements étant connectés en série ;

Galvanomètre à courant continu monté en série avec une galène qui détecte le courant alternatif;

• Téléphone ordinaire ou monotéléphone.

Le galvanomètre de résonance et le téléphone sont les plus sensibles ; ils ont, en effet, l'avantage de posséder un aimant permanent, de sorte que le couple électromagnétique y est proportionnel à l'intensité ; au contraire, dans l'électrodynamomètre, le couple est proportionnel au carré de l'intensité ; il en est de même dans le galvanomètre ordinaire équipé avec une galène, celle-ci ne détectant que partiellement les courants très faibles. Enfin, l'usage de ces deux derniers appareils ne permet pas d'éliminer les harmoniques.

J'ai utilisé comme galvanomètre de résonance un galvanomètre ordinaire transformé ; comme son réglage était très limité, je ne pouvais m'en servir qu'entre 40 et 60 p.s. Pour les autres fréquences inférieures à 400 p.s, j'ai employé un galvanomètre sensible à cadre mobile, muni d'une galène ; au-dessus de 400 p.s, je me suis servi d'un casque téléphonique de $2 \times 4\,000$ ohms.

Remarque. — Dans le réglage du pont, il est nécessaire d'ajuster *simultanément* deux résistances, ce qui conduit à de nombreux tâtonnements. On peut les réduire dans une certaine mesure, en choisissant comme appareil de zéro un instrument sensible non seulement à la grandeur, mais encore à la phase de la tension. J'y suis parvenu aux basses fréquences, en utilisant du courant diphasé. L'appareil de zéro était un électrodynamomètre ; un de ses enroulements était connecté au pont ; l'autre était alimenté à travers une inductance et une résistance réglables, par l'une quelconque des phases, à volonté. Ce montage permettait de savoir sur quelle résistance R' ou r il fallait agir.

IV. MÉTHODE DU PONT. RÉALISATION PRATIQUE. — Le montage d'un pont présente un certain nombre de difficultés ; j'examinerai successivement celles que l'on rencontre dans le cas de capacités très grandes ($1\ \mu\text{F}$) et très petites ($1\ \text{m}\ \mu\text{F}$).

A. *Condensateurs de grande capacité* ($1\ \mu\text{F}$). — La construction de résistances ne présente dans ce cas aucune difficulté. Pour la sensibilité maximum, les bras du pont doivent avoir une résistance de l'ordre de $\frac{1}{C\omega}$, c'est-à-dire :

3 200 ohms à la fréquence 50 p.s et 180 à la fréquence 900 p.s.

Si la valeur de $\operatorname{tg} \alpha$ est 0,05, il faut une résistance série égale à $r = \frac{0,05}{C \omega}$, c'est-à-dire :

160 ohms à la fréquence 50 p/s et 9 ohms à la fréquence 900 p/s.

Pour de telles capacités, la sensibilité est grande, car le courant qui traverse les condensateurs est suffisamment intense ; l'impédance des bras du pont étant bien plus faible que celle de l'appareil de zéro, le léger courant qui traverse ce dernier lorsque l'équilibre n'est pas atteint ne trouble pas sensiblement la répartition des tensions.

Mais l'emploi de capacités considérables présente deux inconvénients qui, la plupart du temps, sont prohibitifs :

1° Il n'existe pas de condensateur étalon de $1 \mu F$ rigoureusement exempt de pertes ; on peut bien employer le mica, mais son emploi n'est légitime que si les condensateurs étudiés sont relativement mauvais et si, par suite, on ne veut calculer les pertes qu'avec une faible approximation absolue. (1)

2° La fabrication des condensateurs à étudier est longue et ne peut être pratiquement réalisée que dans des cas particuliers (par exemple : papier paraffiné, mica, caoutchouc très mince) ; en tous cas, leur montage et leur démontage rapides sont impossibles, de sorte qu'on ne peut avec eux étudier facilement l'influence de l'épaisseur, de l'humidité, du contact avec les armatures, etc.

B. *Condensateurs de faible capacité* ($1 m \mu F$). — Dans ce cas, et lorsqu'on opère à une tension assez basse pour qu'il n'y ait pas d'effluves, l'étalon de capacité peut être facilement réalisé avec un condensateur à air ; mais il ne faudrait pas croire que tous les condensateurs à air soient absolument parfaits. Ils contiennent, en effet, une plus ou moins grande quantité d'isolants solides, et, si ceux-ci ne sont pas judicieusement placés, ils peuvent être le siège de pertes notables.

(1) Pour éviter l'emploi d'un condensateur à mica, on peut utiliser n'importe quel procédé permettant d'obtenir un déphasage variable et calculable.

Par exemple, si l'on possède deux alternateurs identiques dont les rotors sont accouplés rigidement et dont les stators peuvent prendre l'un par rapport à l'autre un déplacement angulaire quelconque, le problème est facilement résolu.

On peut aussi connecter une résistance entre deux bornes consécutives d'un alternateur diphasé ; entre un point quelconque de cette résistance et le point neutre, existe une tension dont on peut faire à volonté varier la phase.

Ce dernier dispositif ne m'a pas donné beaucoup plus de précision que le condensateur à mica, je n'insiste pas sur sa réalisation.

En particulier, il faut rejeter absolument la construction la plus simple (fig. 25) qui consiste à intercaler des cales isolantes entre des plaques métalliques et à joindre celles-ci alternativement à deux bornes ; ces cales, en effet, sont nombreuses et soumises à un champ intense, de sorte que les pertes y sont appréciables.

Le montage employé doit s'inspirer de celui de la figure 26, où les plaques d'une même polarité sont soudées entre elles et où chacune des armatures est supportée par des colonnettes reposant sur de la paraffine. Dans ces conditions le champ dans l'isolant est aussi réduit que l'on veut, de sorte que le condensateur peut être considéré comme parfait.

Il faut remarquer ici que la mesure des pertes de tels condensateurs à air est à peu près impossible ; elles sont beaucoup trop petites pour être décelées par la méthode calorimétrique ; elles



Fig. 25.



Fig. 26.

ne peuvent non plus être mesurées en courant continu ; on doit se borner à construire plusieurs étalons, à les comparer et à n'utiliser que le meilleur.

Un des avantages des étalons de capacité de l'ordre de quelques $m\mu F$, c'est que l'on peut rendre aisément leur capacité variable ; il suffit pour cela d'en modifier légèrement la construction pour permettre à l'une des armatures d'entrer plus ou moins profondément dans l'autre. Il est facile ensuite de construire leur courbe d'étalonnage ; mais il est nécessaire de vérifier que, dans la position la plus défectueuse, c'est-à-dire au zéro de la graduation, l'angle de perte est encore négligeable : on les compare pour cela avec un condensateur non variable comme ceux que j'ai décrits précédemment.

Par contre, si les capacités étudiées sont faibles, certaines capacités parasites pourront prendre une importance appréciable ; il en est ainsi par exemple de la capacité des fils de connexion par rapport au sol si ceux-ci ne sont pas à une distance suffisante de la table d'expériences. Mais c'est surtout la capacité réciproque des deux condensateurs utilisés qu'il faut réduire ; il faut obliger

pour cela les lignes de force électrique qui émanent d'une armature à aboutir à l'armature opposée, et le meilleur moyen consiste à entourer complètement la première par la deuxième ; on y arrive aisément dans les condensateurs fixes en les constituant par un nombre impair de lames, dans les condensateurs variables en les enveloppant d'un cylindre métallique en communication avec l'armature fixe. ⁽¹⁾

Résistances. — Lorsqu'on emploie d'aussi petites capacités (de 1 m μ F), il faut employer des résistances très élevées, mille fois plus grandes, toutes choses égales d'ailleurs, que lorsqu'on emploie des capacités de l'ordre de 1 μ F. On est donc conduit à utiliser pour les bras du pont des résistances variables de l'ordre de quelques mégohms à 50 p:s et de quelques centaines de mille ohms à 900 p:s ; or, des résistances aussi importantes ne peuvent être complètement dénuées d'inductance ni de capacité.

Il est intéressant de remarquer que, dans tous les cas, la résistance à mettre en série avec le condensateur parfait pour obtenir l'équilibre est $\frac{1}{1g^2 \alpha}$ fois plus petite que celle qu'il faudrait mettre en dérivation pour obtenir le même résultat ; il convient donc d'utiliser exclusivement la méthode de Wien qui permet d'employer des résistances environ mille fois plus faibles que celle de Nernst.

C. Modifications apportées au pont de Wien. — Les différents perfectionnements apportés à la constitution du pont sont les suivants :

1° Tout d'abord, on a utilisé pour les bras du pont des résistances en graphite, ce qui leur supprime toute inductance ou capacité, mais ne permet pas de les rendre variables d'une manière continue ; la résistance et la capacité de comparaison étaient toutes deux variables, ce qui permettait le réglage du pont.

2° Grover ⁽²⁾ a remplacé les résistances des bras du pont par deux condensateurs variables à air. Le condensateur étalon était fixe et la résistance en série variable. Ce montage et le suivant donnent aux capacités réciproques entre condensateurs une importance exceptionnelle.

3° Fleming et Dyke ⁽³⁾ ont utilisé trois condensateurs à air va-

⁽¹⁾ Je reviendrai sur cette question à propos de la méthode de résonance.

⁽²⁾ GROVER, *Bulletin of the Bureau of Standards*, vol. 3, p. 371, 1907.

⁽³⁾ FLEMING ET DYKE, *Journal of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 49, p. 323, 1912.

riables et une résistance de comparaison fixe. Le matériel employé dans cette méthode est facile à se procurer, mais le réglage du pont est très délicat ; tout changement dans la capacité de l'un des condensateurs entraîne, en effet, un changement considérable dans celle de chacun des deux autres ; il faut tâtonner au hasard pendant assez longtemps, ce qui est un inconvénient grave dans beaucoup de cas. Enfin, on peut reprocher à ce montage de ne permettre d'étudier que des condensateurs dont la capacité ou les pertes varient seulement dans des limites assez restreintes ; le matériel utilisé pour un condensateur donné ne peut servir à étudier un condensateur de capacité dix fois supérieure.

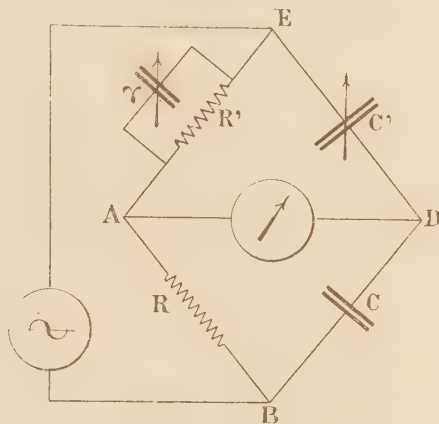


Fig. 27.

D. Montage utilisé. — Je me suis proposé de réaliser un dispositif permettant :

D'employer pour les bras du pont des résistances quelconques ;

D'étudier des condensateurs de capacité quelconque, tout en gardant la sensibilité maximum, en changeant seulement le condensateur étalon ;

De supprimer la grande résistance en série avec l'étalon.

1° J'ai obtenu les premiers résultats en permutant les diagonales du pont (fig. 27). Les résistances dont je me suis servi étaient en général égales et leurs valeurs étaient, suivant les cas, 500, 2 000 ou 10 000 ohms ; elles étaient constituées par du fil de maillechort d'une résistance de 400 ohms par mètre enroulé sur du mica et immergé dans du pétrole. J'obtenais ainsi des résistances pratiquement sans self-induction ni capacité et qui pouvaient sup-

porter sans chauffer des tensions atteignant une centaine de volts. ⁽¹⁾

Considérons maintenant le pont ainsi obtenu dans le cas où, pour simplifier, les résistances R et R' ainsi que les capacités C et C' sont égales.

Le courant dans les résistances est en phase avec la tension d'alimentation. Si la capacité étudiée est parfaite, le courant dans les condensateurs est en quadrature avant avec cette même tension ; les tensions en A et D sont égales et le pont est en équilibre.

Si le condensateur étudié est imparfait, le courant qui traverse DB est, par cela même, légèrement retardé ; on rétablira l'équilibre si, comme dans la méthode de Wien, on retarde de la même quantité le courant dans ED au moyen d'une résistance.

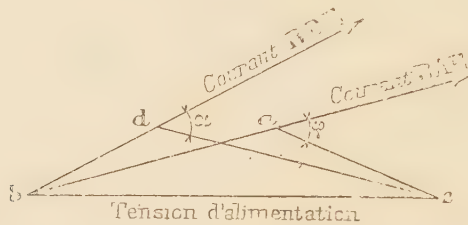


Fig. 28.

Mais, et c'est là le point intéressant, on peut obtenir le même résultat en retardant le courant dans AB à l'aide d'une self-inductance ou en l'avancant dans EA au moyen d'une capacité (figure 28).

2° J'ai donc utilisé le dispositif suivant :

Un condensateur variable est placé en dérivation sur la résistance R' . Si γ est sa capacité actuelle, le déphasage φ du courant total sur la tension dans la branche EA est donné par :

$$\operatorname{tg} \varphi = \gamma R' \omega.$$

Lorsque le pont est en équilibre, ce déphasage φ du courant sur la tension dans la branche EA est égal en valeur absolue au déphasage α de la quantité d'électricité sur la tension dans la branche DB. L'angle de perte α du condensateur étudié est donc donné par $\operatorname{tg} \alpha = \gamma R' \omega$.

La capacité déduite de la formule $C = C'$ est non pas celle que

⁽¹⁾ Ces résistances de comparaison n'ont pas besoin d'être rigoureusement parfaites ; l'essentiel, c'est qu'elles soient affectées de la même manière par l'inductance et la capacité, ce qui est réalisé lorsqu'elles sont égales et bobinées de la même façon.

nous avons définie au balistique, mais celle que nous aurions obtenue par la méthode de Nernst.

La formule précédente montre que la capacité γ nécessaire pour obtenir l'équilibre ne dépend pas de la capacité du condensateur étudié mais dépend seulement des résistances du pont et de l'angle de perte. Avec un condensateur dont la capacité peut varier de 0,05 à 1 m μ F, et avec les valeurs 500, 2 000 et 10 000 ohms, choisies pour les résistances, je puis mesurer à la fréquence 900 des angles de perte dont les tangentes sont comprises entre

$$10^{-9} \cdot 10^4 \cdot 2\pi \cdot 900 = 0,06 \quad \text{et} \quad 0,05 \cdot 10^{-9} \cdot 500 \cdot 2\pi \cdot 900 = 0,0015.$$

À la fréquence de 50 p/s la valeur de 1 m μ F est insuffisante pour γ ; n'ayant pas à ma disposition de capacité variable beau-

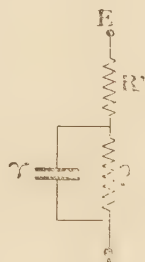


Fig. 29.

coup plus importante, je l'ai remplacée par un condensateur de 1 μ F shunté par une résistance ρ selon le schéma de la figure 29 ; dans ces conditions $\text{tg } \alpha$ est donné par la formule :

$$\text{tg } \alpha = \frac{\rho^2 \gamma \omega}{R' (1 + \rho^2 \gamma^2 \omega^2) + \rho}.$$

Les pertes dans γ et la capacité de ρ n'ayant sur le résultat qu'une influence négligeable, j'ai pris pour γ un condensateur à mica et pour ρ une boîte de résistances ordinaire.

E. *Précautions indispensables.* — Pour la réalisation pratique du pont, j'ai pris enfin un certain nombre de précautions, afin d'éviter toute capacité parasite.

En premier lieu, tous les appareils étaient maintenus à une vingtaine de centimètres au-dessus de la table par des tubes de verre verticaux, les condensateurs variables étaient manœuvrés à distance au moyen de longs manches d'ébonite. Enfin deux condensateurs de 1 μ F étaient montés en série sur la tension d'alimentation et leur borne commune était à la terre.

Pour augmenter la sensibilité ⁽¹⁾ et rendre plus négligeable encore l'action des capacités parasites, je donnais autant que possible à mes condensateurs des capacités supérieures à 1 m μ F.

A la fréquence 900 p/s avec des résistances $R = R' = 2\,000$ ohms, une tension d'alimentation de 50 volts, des condensateurs de 3 m μ F, protégés contre toute capacité parasite et des écouteurs de 4 000 ohms, j'obtenais une approximation supérieure au millièrne pour la capacité et de l'ordre du centième pour les pertes. Le réglage des condensateurs C' et γ durait une quinzaine de secondes.

V. MÉTHODE DE RÉSONANCE. — A. Principe. — Un condensateur avec pertes est, à fréquence constante, assimilable à l'ensemble d'un condensateur parfait et d'une résistance. Pour mesurer cette

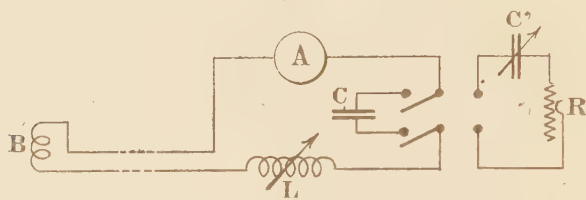


Fig. 30.

dernière, il suffit donc de compenser la capacité par une self-inductance satisfaisant à l'équation $CL\omega^2 = 1$.

La résistance R équivalente aux pertes se déduit alors de la loi d'Ohm : $I = \frac{E}{R}$.

Malheureusement, il n'existe pas de self-inductance parfaite et des pertes ainsi obtenues, il faut soustraire les pertes dans la bobine.

Celles-ci dépendent d'un grand nombre de facteurs (effet de peau, effet de bobinage, etc.), très difficile à évaluer. Aussi est-on conduit à opérer par substitution.

On forme donc un circuit oscillant (fig. 30), avec le condensateur étudié C , une inductance variable L , un ampèremètre et une bobine qui permet un couplage lâche avec un générateur d'ondes entretenues. On agit sur la bobine L jusqu'à ce que l'on obtienne à l'ampèremètre la déviation maximum.

(1) Lorsque la sensibilité est nettement insuffisante, on peut utiliser un amplificateur à lampes.

On remplace alors le condensateur étudié par un condensateur de capacité variable C' à air ⁽¹⁾ en série avec une résistance variable R ; sans toucher à L on fait varier C' et R jusqu'à ce que, à la résonance, l'intensité soit la même que dans le premier cas. La capacité du condensateur étudié est alors $C = C'$ et son angle de perte est déterminé par : $\text{tg } \alpha = C'R \omega$.

B. *Indicateur de résonance.* — Le couplage devant être assez lâche pour que la résonance soit nette, l'intensité dans le circuit oscillant est relativement faible. Les ampèremètres thermiques ordinaires ne sont sensibles que pour des courants supérieurs au centième d'ampère et encore ont-ils pour cette sensibilité une forte résistance, une vingtaine d'ohms généralement ; pour des fréquences élevées, leur emploi est à peu près impossible parce que c'est en eux que se trouve la principale cause d'amortissement du circuit oscillant.

L'emploi de couples thermoélectriques est, au contraire, tout indiqué. Celui dont je me servais avait une résistance de 2 ohms environ ; comme il jouait simplement le rôle d'indicateur de résonance, je ne l'avais pas étalonné.

Je ne désirais pas une précision excessive dans mes mesures, mais plutôt un montage simple, autant que possible à l'abri d'erreurs systématiques. Aussi n'ai-je pas utilisé une intéressante méthode de zéro due à Bairsto ⁽²⁾ et dont il convient de rappeler le principe :

On oppose la f.e.m. thermoélectrique à une tension variable prise sur un potentiomètre ; on règle celui-ci pour que, à la résonance, un galvanomètre intercalé dans le circuit reste au zéro. On obtient ainsi une grande sensibilité.

Bairsto utilisait d'ailleurs un commutateur tournant qui permettait rapidement le condensateur étudié et l'étalon ; en série avec chacun d'eux se trouvait un thermocouple et c'est la différence de leurs échauffements qu'il mesurait. Cette dernière disposition, nécessaire lorsque les ondes sont produites par un générateur à arc forcément instable, est tout à fait inutile quand on emploie un générateur aussi régulier que des tubes électroniques et ne peut alors être qu'une source de complications et d'erreurs.

⁽¹⁾ Si l'on craint que le condensateur à air ne soit pas parfait, comme ses pertes sont indépendantes de sa capacité actuelle, on peut le laisser connecté en permanence, mais en le laissant au zéro.

⁽²⁾ BAIRSTO. *Proceedings of the Royal Society*, 1920, vol. XCVI, p. 363.

C. *Résistances.* — La résistance qu'il faut mettre en série (1) avec le condensateur à air pour obtenir le même amortissement qu'avec le condensateur étudié est relativement faible. Pour une capacité de $1 \text{ m}\mu\text{F}$ et une longueur d'onde de 1 000 mètres, sa valeur est :

5 ohms, pour $\text{tg } \alpha = 0,01$ et 0,5 ohms, pour $\text{tg } \alpha = 0,001$

La construction de telles résistances est aisée et l'on n'a pas, en général, à craindre l'influence du « skin effect ». En effet, le rapport entre la résistance R_1 en alternatif et la résistance R en continu ne dépend, à fréquence constante, que de la résistance linéaire et est égal, pour des matériaux non magnétiques à :

$$\frac{R_1}{R} = 1 + \frac{\omega^2 l^2}{12 R^2} \text{ en unités c. g. s.}$$

En unités pratiques, en faisant apparaître le diamètre d du fil et sa résistivité ρ il vient :

$$\frac{R_1}{R} = 1 + \frac{\omega^2 d^4}{19,5 \cdot 10^{10} \rho^2}$$

Pour que l'influence du « skin effect » soit inférieure à 1 pour 100 à la fréquence 300 000 p/s il faut que

$$\frac{4 \pi^2 \cdot 9 \cdot 10^{10} \cdot d^4}{19,5 \cdot 10^{10} \cdot \rho^2} < 10^{-2} \quad \text{ou} \quad d < 15 \sqrt{\rho}$$

ce qui donne comme diamètre maximum :

0,2 mm pour le cuivre ;

0,45 mm pour le platine ;

1,5 mm pour le mercure ;

1 mm pour le constantan supposé non magnétique.

La longueur correspondante, indépendante de la nature du métal est environ 2 mètres pour 1 ohm.

Il convient de se tenir bien au-dessous des valeurs précédentes, mais on ne doit pas adopter le fil le plus fin que l'on ait à sa disposition, parce qu'il conduirait à des longueurs beaucoup trop petites, difficiles à mesurer et à fractionner. Avec du fil de 500 ohms par mètre, par exemple, il suffirait, pour une résistance de 1 ohm, de 2 mm de long ; même si l'on se contentait d'une approximation de 5 pour 100, il faudrait pouvoir faire varier la longueur de ce fil par fractions d'un dixième de millimètre, ce qui est extrêmement délicat. Au contraire, avec du fil de 50 ohms

(1) Bairsto mettait en dérivation sur le condensateur à air une résistance variable à eau.

au mètre, il suffit de faire varier la longueur millimètre par millimètre (1).

D. *Couplage par capacité parasite.* — Une erreur systématique importante peut provenir de la capacité de fuite des condensateurs étudiés. Le condensateur du circuit en résonance produit des lignes de force ; toutes celles qui émanent d'une armature ne vont pas forcément tomber directement sur l'autre ; les unes vont aboutir aux murs de la salle ou à la table d'expériences, les autres au condensateur du circuit générateur d'ondes. Il s'ensuit qu'au couplage magnétique entre les deux circuits se superpose un couplage électrostatique (2). Si par exemple la capacité de fuite du condensateur étudié est plus grande que celle de l'étalon et si, d'autre part, le couplage électrostatique tend à renforcer le couplage électromagnétique, on devra, pour obtenir la même intensité à la résonance, augmenter la résistance de comparaison et, par suite, l'angle de perte observé sera supérieur à l'angle de perte réel.

De plus, les lignes de force qui aboutissent aux murs et à la table se ferment à travers de très mauvais diélectriques et introduisent un amortissement supplémentaire dans le circuit de résonance (3).

Pour ces deux raisons, les mesures ne peuvent être correctes que si le condensateur étudié et le condensateur étalon ont des capacités de fuite identiques ; le procédé le plus efficace pour obtenir ce résultat consiste à enfermer les condensateurs dans des boîtes métalliques identiques et disposées de la même façon.

Comme dans la méthode du pont, j'ai dû éloigner tous les appareils utilisés à une vingtaine de centimètres de la table et les commander par de longs manches en ébonite. La zone de résonance étant fort étroite et les mesures n'étant légitimes qu'à la résonance exacte, j'ai dû employer un variomètre et un condensateur à air d'une extrême sensibilité. Le circuit de résonance était convenablement éloigné du circuit excitateur.

(1) On y arrive aisément en constituant à l'avance des cavaliers interchangeables, formés de fils de constantan soudés à deux gros fils de cuivre et en les plongeant dans deux godets remplis de mercure. On peut, d'ailleurs, obtenir une approximation supérieure en procédant par interpolation.

(2) Pour voir si ce couplage existe, il suffit d'inverser les pôles du condensateur en résonance ; le couplage par capacité change alors de signe.

(3) La masse du galvanomètre restant à un potentiel sensiblement constant, il peut se produire également des pertes (MESNY, *Onde électrique*, mai 1922) dans l'isolant du fil, mais elles n'ont ici aucune importance, puisqu'elles subsistent pour les deux condensateurs.

CHAPITRE IV

CAUSES DIVERSES INFLUANT SUR LES PERTES

I. INFLUENCE DE LA FRÉQUENCE. — A. *Généralités.* — Un grand nombre d'auteurs ont étudié l'action de la fréquence sur les pertes dans les diélectriques, mais les résultats ont tout d'abord varié beaucoup avec la méthode employée.

Au début, on a utilisé le courant d'une machine statique périodiquement interrompu par des étincelles ; le diélectrique était alors soumis à une série de décharges oscillantes ; dans ces conditions, il était naturel de constater un échauffement proportionnel à la fréquence des étincelles, c'est-à-dire au nombre de trains d'onde.

On a ensuite évalué les pertes en planimétrant le cycle de viscosité, mais celui-ci était obtenu au moyen de balistiques à périodes d'oscillation trop courtes qui n'enregistraient pas convenablement les décharges lentes. Il en résulte qu'à très basse fréquence, la surface des cycles était considérablement réduite. Mercanton a trouvé ainsi que la perte par cycle passait par un maximum pour une fréquence voisine de 1 p:s.

Plus récemment quelques expériences systématiques ont été entreprises. Les résultats obtenus par Fleming et Dicke (pont, fréquence téléphonique), Bouzon (méthode calorimétrique, haute fréquence), Mesny et Schott (méthode de résonance, haute fréquence), indiquent des pertes sensiblement proportionnelles à la fréquence.

Il ne convient d'accepter les résultats précédents que comme une première approximation, l'intervalle des fréquences utilisées étant relativement peu étendu.

Une étude plus complète a été faite par Bairsto en haute fréquence ; il a trouvé que dans le cas de bons isolants, les pertes passaient par un maximum très net pour une certaine fréquence voisine de 600 000 p:s. Toutefois, certaines de ses expériences gagneraient à être reprises et pourraient ainsi bénéficier des progrès réalisés durant ces dernières années par les tubes à 3 électrodes.

J'ai pensé que pour dégager des expériences une loi générale, il fallait opérer sur une échelle de fréquence beaucoup plus étendue. Mes essais ont porté sur des fréquences comprises entre 0,00029 p:s et 65 000 000 p:s. Les différentes méthodes de mesure n'étant pratiquement utilisables que dans une zone de fréquences

relativement restreinte, j'ai dû employer successivement plusieurs montages.

A très basse fréquence, j'ai utilisé une méthode dérivant de l'oscillographe. Pour des fréquences basses, moyennes et téléphoniques, j'ai étudié au pont des condensateurs de grande capacité (dans le but d'accroître la sensibilité et de faire disparaître certaines sources d'erreur) ; j'ai d'ailleurs contrôlé les résultats au balistique. Enfin, à haute fréquence, j'ai renoncé en général à la méthode de résonance, trop délicate pour des essais à fréquence variable pour utiliser la méthode calorimétrique, plus longue, moins sensible, mais plus sûre.

Comme on le verra dans la suite, les divers condensateurs que l'on peut former avec un même diélectrique ont généralement

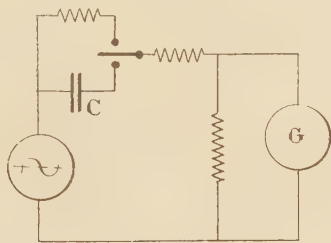


Fig. 51.

des propriétés bien différentes et, dès lors, l'étude particulière d'un échantillon n'offre qu'un intérêt secondaire. Ce que je me suis proposé surtout dans les paragraphes suivants, c'est l'amélioration des procédés de mesure et la discussion des résultats expérimentaux.

B. Très basse fréquence. — A fréquence très basse, l'usage du balistique devient pénible. Il faut, en effet, un assez grand nombre de points pour déterminer le cycle de viscosité et, pour chacun d'eux, on doit laisser s'effectuer plusieurs périodes ; chaque décharge demande également un temps fort long. Enfin, le balistique ne donne aucune précision sur l'angle de perte qu'il détermine par son sinus très voisin de l'unité.

La méthode oscillographique présente, pour ces fréquences, l'avantage d'être très simple. Voici le dispositif que j'ai employé :

La source à courant alternatif alimente en série le condensateur à étudier et une résistance ; en dérivation sur celle-ci est branché un galvanomètre à indications très rapides dont on règle la sensibilité et l'amortissement au moyen d'une résistance

en série et d'un shunt. Pour repérer la phase, on dispose sur l'axe de l'appareil une came qui fait fonctionner un timbre chaque fois qu'elle repasse par la même position.

Au début, on remplace momentanément le condensateur par une résistance, puis on fait tourner lentement la cuve à eau acidulée jusqu'à ce que le timbre se fasse entendre quand le spot est au zéro. Le réglage étant ainsi effectué, on remet le condensateur en place et l'on note la déviation β_0 quand le timbre se fait entendre et la déviation maximum β . Si l'étalonnage a donné une déviation θ pour le courant qui traverse I mégohm alimenté sous le $\frac{1}{n^c}$ de la tension normale, on en déduit immédiatement :

$$\text{L'impédance } s = \frac{n \theta}{\beta} \text{ mégohms ;}$$

L'angle des pertes totales $\cos \alpha' = \frac{\beta_0}{\beta}$ (si n est le même dans les deux cas) ;

$$\text{La capacité réactive } C_r = \frac{\beta_0}{\omega n \theta} \text{ microfarads.}$$

Les essais ont porté sur des condensateurs à papier paraffiné ; comme ces fréquences sont relativement peu intéressantes, je donne seulement les résultats relatifs à deux condensateurs ; les pulsations ω sont exprimées en radians par seconde, les capacités en microfarads :

CONDENSATEUR N° 2							
ω	n	θ	β	β_0	s	$\cos \alpha'$	C_r
0,074	1	165	53,5	25	3,08	0,47	2,08
0,0087	6,2	183	186	64	6,1	0,345	6,50
0,0018	6,2	183	130	27	8,7	0,208	13,2

CONDENSATEUR N° 3							
ω	n	θ	β	β_0	s	$\cos \alpha'$	C_r
0,074	1	165	129	23,7	1,28	0,184	1,94
0,0087	1	165	86		1,92		
0,0087	6,2	183		57		0,097	5,80
0,0018	1	165	77		2,14		
0,0018	6,2	183		27,5		0,052	13,5

J'ai déjà indiqué que l'essai à l'oscillographe devait être complété par une mesure de résistance en courant continu. Mais, dès à présent, il est possible de tirer des résultats précédents une conclusion intéressante : *la capacité réactive augmente énormément quand la fréquence diminue.*

Pour déterminer la capacité totale C telle que je l'ai définie au

balistique et l'angle de pertes par viscosité pure α , j'ai effectué un essai en courant continu. La résistance d'isolement obtenue a été :

$R = 12,5$ mégohms pour le condensateur n° 2.

$R = 2,65$ mégohms pour le condensateur n° 3.

En utilisant les relations géométriques simples données par la figure 32, j'ai alors calculé les nombres suivants :

CONDENSATEUR N° 2			
	$\omega = 0,074$	$\omega = 0,0087$	$\omega = 0,0018$
$\frac{I}{S \omega}$	4,4	18,9	64
$\frac{I}{R \omega} + C_a = \frac{\sin \alpha'}{S \omega}$	3,90	17,8	63
$\frac{I}{R \omega}$	1,08	9,2	44,5
C_a (microfarads)	2,82	8,6	18,5
$\operatorname{tg} \alpha = \frac{C_a}{C_r}$	1,37	1,32	1,40
$C = \sqrt{C_a^2 + C_r^2}$	3,5	10,8	22,6

CONDENSATEUR N° 3			
	$\omega = 0,074$	$\omega = 0,0087$	$\omega = 0,0018$
$\frac{I}{S \omega}$	10,7	60	260
$\frac{I}{R \omega} + C_a = \frac{\sin \alpha'}{S \omega}$	10,5	60	260
$\frac{I}{R \omega}$	3,6	30,5	210
C_a (microfarads)	6,9	29,5	50
$\operatorname{tg} \alpha = \frac{C_a}{C_r}$	3,55	5,1	3,8
$C = \sqrt{C_a^2 + C_r^2}$	7,2	30	50

Il ne faut accorder aux chiffres ci-dessus qu'une importance relative ; par suite de l'incertitude avec laquelle on connaît la résistance on ne peut déterminer que très grossièrement la capacité totale C et l'angle de pertes par viscosité pure lorsque la fréquence devient trop faible. Toutefois, on peut tirer des essais précédents certaines indications :

Lorsque la fréquence devient de plus en plus basse, les deux composantes de la capacité croissent énormément, l'angle de pertes par viscosité reste à peu près constant, l'angle de pertes totales vers 90° .

C. *Moyenne fréquence.* — Pour les fréquences industrielles, j'ai utilisé la décharge directe du condensateur dans un balistique muni ou non d'une bobine de compensation et d'un aimant. Je n'ai pu descendre facilement au-dessous de la fréquence 0,01 p/s parce que la décharge dure alors trop longtemps ; je n'ai pas, d'autre part, dépassé la fréquence 150 car déjà, dans ces conditions, le cycle est fort aplati et la précision insuffisante.

J'ai également effectué des mesures au pont ; la capacité et les pertes des condensateurs étudiés étant considérables, j'ai employé la méthode de Wien non modifiée. J'ai été limité vers le bas dans l'échelle des fréquences par la valeur énorme que doivent avoir les résistances et par la faible sensibilité obtenue. La plus haute fréquence étudiée correspond en général à l'onde fondamentale et à la vitesse maximum de mon alternateur ; je

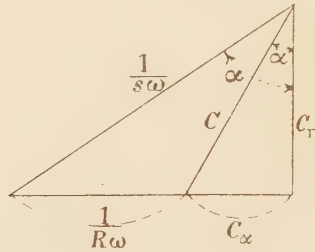


Fig. 32.

n'ai fait résonner un harmonique que dans un cas particulier, pour le condensateur n° 4 dont l'angle de perte semblait passer par un minimum.

Je citerai les résultats obtenus avec un certain nombre de très mauvais condensateurs pour lesquels l'influence de la fréquence est particulièrement nette :

Condensateur n° 2	papier paraffiné,	fabrication industrielle.
— n° 3 —	—	fabriqué au laboratoire.
— n° 4 —	—	fabrication industrielle.
— n° 12	papier imprégné à la vaseline.	
— n° 17 —	—	à la cire.

Les premiers tableaux indiquent les nombres qui ont servi au tracé des cycles ; après les avoir résumés brièvement, je passerai aux résultats obtenus au pont.

Pour chaque condensateur, on a tracé 8 cycles sous une tension maximum de 100 volts ; les pulsations ω sont évaluées en radians par seconde, les tensions instantanées en volts et les charges correspondantes en microcoulombs.

CONDENSATEUR N° 2 (Balistique)

$\epsilon = 0,059$

VOLTS	MICROCOULOMBS
38 cr.	— 175
85	— 3
99	112
97 décr.	228
80	262
54	288
28	281
13	246
5	232

$\epsilon = 36$

VOLTS	MICROCOULOMBS
2 cr.	— 13
26	— 3
70	17
95	32
92 décr.	39
71	37
35	27
3	13

$\epsilon = 0,3$

VOLTS	MICROCOULOMBS
24 cr.	— 106
52	— 33
74	— 5
94	26
96 décr.	150
72	176
44	178
1	144

VOLTS	MICROCOULOMBS
5 cr.	— 6,5
39	2
70	10,6
95	20,3
91 décr.	25,8
69	23,1
35	14,8
2	7,2

$\epsilon = 0,81$

VOLTS	MICROCOULOMBS
25 cr.	— 50
52	— 8
86	51
95	72
83 décr.	122
62	129
36	117
6	95

VOLTS	MICROCOULOMBS
10 cr.	— 1,2
49	5
81	10,3
95	14,2
96 décr.	17,5
70	14,8
35	10,2
— 3	3,3

$\epsilon = 1$

VOLTS	MICROCOULOMBS
5 cr.	— 21
35	— 5
72	18
91	35
96 décr.	55
80	53
46	44
0	24

$\epsilon = 180$

VOLTS	MICROCOULOMBS
3 cr.	— 0,3
35	1,3
81	7
93	8,5
97 décr.	9,7
65	6,8
24	2,8
0	0,7

CONDENSATEUR N° 3 (Balistique)

$\omega = 0.059$		$\omega = 36$	
VOLTS	MICROCOULOMBS	VOLTS	MICROCOULOMBS
5 cr.	— 2 960	— 2 cr.	— 17
28	— 2 870	26	— 12,5
71	— 1 750	70	— 0,6
97	— 720	95	17,1
96 décr.	1 980	92 décr.	28,2
71	2 820	71	29,8
54	3 010	35	26
21	2 910	3	18,2
3	2 960		

$\omega = 0,3$		$\omega = 71$	
VOLTS	MICROCOULOMBS	VOLTS	MICROCOULOMBS
2 cr.	— 770	5 cr.	— 9,2
34	— 745	39	— 4,6
72	— 380	70	0,2
98	315	95	8,2
89 décr.	710	91 décr.	18,5
65	790	69	19,8
41	790	35	16,5
3	770	2	10,5

$\omega = 0,81$		$\omega = 195$	
VOLTS	MICROCOULOMBS	VOLTS	MICROCOULOMBS
2 cr.	— 380	10 cr.	— 5,1
31	— 320	49	1,2
82	— 130	81	6,8
95	16	95	10,2
93 décr.	330	96 décr.	12,6
72	395	70	11,7
31	395	35	9,5
2	365	— 3	6,1

$\omega = 1$		$\omega = 980$	
VOLTS	MICROCOULOMBS	VOLTS	MICROCOULOMBS
— 3 cr.	— 40,5	3 cr.	— 2,8
31	— 31	35	0,2
69	— 9,5	81	4,1
94	38	93	5,5
97 décr.	81	97 décr.	7,9
72	93	65	7
49	102	24	4,6
5	81	0	3,1

CONDENSATEUR N° 4 (Balistique)

$\omega = 0,059$		$\omega = 36$	
VOLTS	MICROCOULOMBS	VOLTS	MICROCOULOMBS
— 4 cr.	— 1 030	0 cr.	— 13,5
40,7	— 885	35	36
76	— 472	58	70
83,5	— 174	84	109
96 décr.	523	98	140
65	920	93 décr.	141
26	920	61	97
0	984	7,5	25,5
$\omega = 0,3$		$\omega = 74$	
VOLTS	MICROCOULOMBS	VOLTS	MICROCOULOMBS
5,3 cr.	— 380	0 cr.	— 4
45	— 324	31	35
72	— 185	55	78
88	— 102	90	117
97 décr.	274	98 décr.	135
72	350	70	111
41	384	48	57
0	384	—3,5	1
$\omega = 0,81$		$\omega = 195$	
VOLTS	MICROCOULOMBS	VOLTS	MICROCOULOMBS
0 cr.	— 236	4 cr.	0
26	— 215	41	48
61	— 148	65	83
95	5	82	121
98	171	94 décr.	129
72 décr.	308	75	103
31,5	285	39	40
— 2,5	215	0	3,5
$\omega = 4$		$\omega = 980$	
VOLTS	MICROCOULOMBS	VOLTS	MICROCOULOMBS
3	— 62	0 cr.	— 3,5
39	23	39	47
83	114	56	82
96	170	96	128
96 décr.	225	95 décr.	124
72	202	64	86
28	114	40	51
— 2	58,5	2	4

CONDENSATEUR N° 12 (Balistique)

$\omega = 0,059$		$\omega = 36$	
VOLTS	MICROCOULOMBS	VOLTS	MICROCOULOMBS
— 1 cr.	— 2 640	10 cr.	— 58,5
42,3	— 1 720	52	62
74,5	— 1 060	75	145
94,5	— 905	94	238
96 décr.	1 520	89 décr.	263
63	2 420	68	252
26	2 380	40	275
4,4	2 400	5	88

$\omega = 0,3$		$\omega = 74$	
VOLTS	MICROCOULOMBS	VOLTS	MICROCOULOMBS
5,5 cr.	— 780	0 cr.	— 81,5
52,2	— 435	41	27,5
74	— 196	74	135
92	42,5	95	218
96,5 décr.	620	99 décr.	250
71,5	873	91	247
35	871	64,5	210
4,4	770	5	77

$\omega = 0,81$		$\omega = 195$	
VOLTS	MICROCOULOMBS	VOLTS	MICROCOULOMBS
0 cr.	— 585	— 5 cr.	— 32
26	— 465	28	44
61	— 186	72	240
95	215	96	204
98 décr.	445	94 décr.	213
72	715	66	158
31	723	31	89
— 2	603	2	25

$\omega = 4$		$\omega = 980$	
VOLTS	MICROCOULOMBS	VOLTS	MICROCOULOMBS
3 cr.	— 232	5 cr.	0
39	— 121	42	76
83	72	80	155
96	176	96	192
96 décr.	370	81 décr.	191
72	415	66	140
26	307	31	75
— 2	192	1	10

CONDENSATEUR N° 17 (Balistique)

$\omega = 0,059$

VOLTS	MICROCOULOMBS
— 1 cr.	— 1 860
42,3	— 1 790
74,5	— 1 550
94,5	— 825
96 décr.	1 040
63	1 880
26	2 030
4,4	1 820

$\omega = 36$

VOLTS	MICROCOULOMBS
0 cr.	— 27
35	— 3,5
58	16
84	40,5
98	64
93 décr.	74
61	61
7,5	25,5

$\omega = 0,3$

VOLTS	MICROCOULOMBS
5,5 cr.	— 520
52,2	— 365
74	— 225
92	— 43
96,5 décr.	310
71,5	538
35	590
4,4	570

$\omega = 74$

VOLTS	MICROCOULOMBS
0 cr.	— 21
31	0
55	17
90	49
98 décr.	64
70	56
48	46,5
— 3	16

$\omega = 0,81$

VOLTS	MICROCOULOMBS
0 cr.	— 314
26	— 270
61	— 192
95	33
98 décr.	215
72	325
31	340
— 2	274

$\omega = 195$

VOLTS	MICROCOULOMBS
4 cr.	— 8,5
41	12
65	28
92	44
94 décr.	52,5
75	45
39	29
0	11

$\omega = 4$

VOLTS	MICROCOULOMBS
3 cr.	— 45,5
39	— 19,5
83	39
96	71,5
96 décr.	122
72	158
26	75
— 2	52

$\omega = 980$

VOLTS	MICROCOULOMBS
0 cr.	— 3,5
39	15
56	23
96	42,3
95 décr.	44
64	30,5
40	20,4
2	5

Des mesures précédentes, j'ai déduit :

La capacité en microfarads C ;

L'angle de perte par viscosité pure α en degrés ;

Les pertes W en ergs par seconde correspondant à 1 volt efficace.

Ces quantités sont contenues dans le tableau suivant :

	N° 2	N° 3	N° 4	N° 12	N° 17
$\omega = 980$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 0,97 \\ \sin \alpha = 0,07 \\ \alpha = 4^{\circ} \\ W = 67 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 0,08 \\ \sin \alpha = 0,40 \\ \alpha = 23^{\circ} \\ W = 314 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 1,3 \\ \sin \alpha = 0,02 \\ \alpha = 1^{\circ} \\ W = 255 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 1,92 \\ \sin \alpha = 0,04 \\ \alpha = 2^{\circ}30' \\ W = 755 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 0,45 \\ \sin \alpha = 0,1 \\ \alpha = 6^{\circ} \\ W = 440 \end{array} \right.$
$\omega = 195$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 0,175 \\ \sin \alpha = 0,1 \\ \alpha = 11^{\circ} \\ W = 65 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 0,130 \\ \sin \alpha = 0,50 \\ \alpha = 30^{\circ} \\ W = 127 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 1,3 \\ \sin \alpha = 0,03 \\ \alpha = 2^{\circ} \\ W = 76 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 2,2 \\ \sin \alpha = 0,09 \\ \alpha = 5^{\circ} \\ W = 385 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 0,53 \\ \sin \alpha = 0,21 \\ \alpha = 12^{\circ} \\ W = 215^{\circ} \end{array} \right.$
$\omega = 71$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 0,26 \\ \sin \alpha = 0,27 \\ \alpha = 16^{\circ}30' \\ W = 52 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 0,20 \\ \sin \alpha = 0,53 \\ \alpha = 32^{\circ} \\ W = 78 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 1,35 \\ \sin \alpha = 0,04 \\ \alpha = 2^{\circ}30' \\ W = 40 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 2,5 \\ \sin \alpha = 0,25 \\ \alpha = 11^{\circ} \\ W = 460 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 0,65 \\ \sin \alpha = 0,32 \\ \alpha = 19^{\circ} \\ W = 158 \end{array} \right.$
$\omega = 36$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 0,4 \\ \sin \alpha = 0,27 \\ \alpha = 16^{\circ}30' \\ W = 39 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 0,31 \\ \sin \alpha = 0,60 \\ \alpha = 37^{\circ} \\ W = 65 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 1,42 \\ \sin \alpha = 0,1 \\ \alpha = 6^{\circ} \\ W = 51 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 2,7 \\ \sin \alpha = 0,15 \\ \alpha = 11^{\circ} \\ W = 185 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 0,75 \\ \sin \alpha = 0,36 \\ \alpha = 18^{\circ} \\ W = 81 \end{array} \right.$
$\omega = 4$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 0,56 \\ \sin \alpha = 0,43 \\ \alpha = 26^{\circ} \\ W = 9,6 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 1,05 \\ \sin \alpha = 0,75 \\ \alpha = 50^{\circ} \\ W = 32 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 2,3 \\ \sin \alpha = 0,05 \\ \alpha = 20^{\circ} \\ W = 32 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 4,2 \\ \sin \alpha = 0,18 \\ \alpha = 29^{\circ} \\ W = 80 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 1,60 \\ \sin \alpha = 0,55 \\ \alpha = 35^{\circ} \\ W = 32 \end{array} \right.$
$\omega = 0,81$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 1,3 \\ \sin \alpha = 0,7 \\ \alpha = 45^{\circ} \\ W = 7,3 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 4 \\ \sin \alpha = 0,92 \\ \alpha = 67^{\circ} \\ W = 29 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 3,1 \\ \sin \alpha = 0,68 \\ \alpha = 43^{\circ} \\ W = 17 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 7,25 \\ \sin \alpha = 0,86 \\ \alpha = 60^{\circ} \\ W = 50 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 3,5 \\ \sin \alpha = 0,89 \\ \alpha = 54^{\circ} \\ W = 22,5 \end{array} \right.$
$\omega = 0,3$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 1,8 \\ \sin \alpha = 0,8 \\ \alpha = 55^{\circ} \\ W = 4,3 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 7,9 \\ \sin \alpha = 0,88 \\ \alpha = 80^{\circ} \\ W = 23 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 3,84 \\ \sin \alpha = 1 \\ \alpha = 90^{\circ} \\ W = 11,5 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 8,75 \\ \sin \alpha = 0,87 \\ \alpha = 61^{\circ} \\ W = 22,5 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 5,9 \\ \sin \alpha = 0,92 \\ \alpha = 67^{\circ} \\ W = 16 \end{array} \right.$
$\omega = 0,059$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 2,9 \\ \sin \alpha = 0,8 \\ \alpha = 55^{\circ} \\ W = 1,4 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 32 \\ \sin \alpha = 0,99 \\ \alpha = 82^{\circ} \\ W = 18 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 9,85 \\ \sin \alpha = 1 \\ \alpha = 90^{\circ} \\ W = 5,9 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 21,2 \\ \sin \alpha = 0,99 \\ \alpha = 82^{\circ} \\ W = 14,5 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} C = 20 \\ \sin \alpha = 0,92 \\ \alpha = 67^{\circ} \\ W = 11 \end{array} \right.$

Voici maintenant les résultats obtenus au pont de Wien. (R et

R' représentent les bras du pont, r et C' la résistance et la capacité de comparaison, C la capacité étudiée, α l'angle de pertes totales correspondant à 1 volt efficace, et ω la pulsation en radians par seconde) :

(AU PONT)

$\omega = 1,8$					
	N° 2	N° 3	N° 4	N° 12	N° 17
R'	51 000	impossible	120 000	100 000	150 000
R	100 000	—	100 000	68 000	100 000
r	200 000	—	120 000	165 000	230 000
C'	2	—	2	3	2
C	1,02	—	2,4	4,4	3
$\lg \alpha$	0,72	—	0,43	0,90	0,83
α	36°	—	23°	42°	40°
W	8,55	—	15,5	40	26,8
$\omega = 10,5$					
	N° 2	N° 3	N° 4	N° 12	N° 17
R'	40 000	51 000	90 000	100 000	58 000
R	103 000	100 000	100 000	83 000	100 000
r	30 000	110 000	8 600	14 000	24 500
C'	1,4	1	2	3	1,9
C	0,54	0,51	1,8	3,6	1,1
$\lg \alpha$	0,44	1,15	0,18	0,45	0,49
α	24°	49°	10°	24°	26°
W	29,5	25,5	34,5	145	45,5
$\omega = 26,2$					
	N° 2	N° 3	N° 4	N° 12	N° 17
R'	7 300	9 250	9 600	9 300	8 800
R	20 000	33 000	6 000	2 900	11 000
r	13 900	31 000	3 300	8 800	13 900
C'	1	1	1	1	1
C	0,39	0,28	1,6	3,2	0,8
$\lg \alpha$	0,365	0,81	0,087	0,23	0,365
α	20°	39°	5°	13°	20°
W	32,5	36	37	185	65,5
$\omega = 41,5$					
	N° 2	N° 3	N° 4	N° 12	N° 17
R'	3 850	1 000	5 850	10 000	6 100
R	11 000	9 200	4 000	3 550	8 200
r	6 900	16 000	1 400	4 500	8 000
C'	1	1	1	1	1
C	0,35	0,22	1,46	2,8	0,74
$\lg \alpha$	0,305	0,70	0,062	0,20	0,35
α	17°	35°30'	3°30'	11°	19°30'
W	43	45	40	240	100

(AU PONT)

$\omega = 90,5$

	N° 2	N° 3	N° 4	N° 12	N° 17
R'	1 300	1 670	4 900	5 610	3 510
R	3 750	9 900	3 470	2 500	5 500
r	3 400	7 100	570	1 600	3 000
C'	1	1	1	1	1
C	0,26	0,17	1,41	2,24	0,64
$\text{tg } z$	0,308	0,64	0,051	0,145	0,27
z	17°	32°30'	3°	8°20'	15°
W	67	70	65	290	145

$\omega = 222$

	N° 2	N° 3	N° 4	N° 12	N° 17
R'	1 900	1 320	5 040	4 320	2 550
R	10 500	11 000	3 700	2 060	4 700
r	1 210	2 750	160	430	950
C'	1	1	1	1	1
C	0,18	0,12	1,35	2,15	0,54
$\text{tg } z$	0,265	0,60	0,035	0,096	0,21
z	15°	31°	2°	5°30'	12°
W	97	115	103	460	240

$\omega = 310$

	N° 2	N° 3	N° 4	N° 12	N° 17
R'	1 800	1 070	3 950	5 910	2 100
R	10 200	10 500	2 900	2 250	4 000
r	615	1 510	85	150	550
C'	1	1	1	1	1
C	0,175	0,102	1,36	2,10	0,52
$\text{tg } z$	0,21	0,51	0,029	0,076	0,153
z	12°	28°	1°40'	4°20'	8°40'
W	120	140	133	540	220

$\omega = 1020$

	N° 2	N° 3	N° 4	N° 12	N° 17
R'	1 565	905	540	408	350
R	11 000	11 000	400	195	735
r	140	450	20	52	102
C'	1	1	1	1	1
C	0,142	0,082	1,35	2,1	0,48
$\text{tg } z$	0,143	0,46	0,0205	0,053	0,10
z	8°10'	24°40'	1°10'	3°	5°10'
W	205	320	280	1 130	470

(AU PONT)

$\omega = 1620$					
	N° 2	N° 3	N° 4	N° 12	N° 17
R'	505	200	1 075	1 700	377
R	3 712	3 100	810	809	817
r	64	220	10	29	43
C'	1	1	1	1	1
C	0,136	0,064	1,33	2,11	0,46
$\text{tg } \alpha$	0,104	0,36	0,016	0,047	0,07
α	6°	20°	1°	2°40'	4°
W	230	375	342	1 600	520

$\omega = 2980$			$\omega = 2050$ (1)		
	N° 2	N° 3	N° 4	N° 12	N° 17
R'	665	335	352	1 700	420
R	5 015	5 700	465	818	920
r	32	112	5	24	30
C'	1	1	1	1	1
C	0,133	0,059	1,32	2,07	0,46
$\text{tg } \alpha$	0,095	0,33	0,015	0,049	0,062
α	5°25'	18°	1°	2°50'	3°30'
W	385	525	590	2 080	580

$\omega = 5610$					
	N° 2	N° 3	N° 4	N° 12	N° 17
R'	200	200	390	400	430
R	1 571	3 640	300	196	950
r	15	55	5	9	8
C'	1	1	1	1	1
C	0,127	0,055	1,30	2,05	0,45
$\text{tg } \alpha$	0,084	0,31	0,028	0,05	0,045
α	4°50'	17°	1°35'	2°50'	2°30'
W	600	870	2 040	5 750	1 130

$\omega = 16500$

Condensateur n° 4: $C = 1,28$ $\text{tg } \alpha = 0,053$ $\alpha = 3^\circ$ $W = 11200$

D. *Haute fréquence.* — Les essais à haute fréquence ont été effectués au calorimètre par la méthode déjà indiquée. Sous tension constante, l'intensité et par suite l'échauffement, varient considérablement avec la fréquence ; les pertes par rayonnement qui sont proportionnelles à l'échauffement croissent dans les mêmes

(1) La rupture d'une courroie a empêché de terminer l'essai à la même fréquence.

proportions, mais le rapport entre la chaleur perdue et la chaleur dégagée reste constant pour une même durée d'essai. Cette remarque montre que le même étalonnage reste valable, quel que soit l'échauffement, pourvu qu'on ne change pas la durée de l'expérience.

Mais, il ne peut en être ainsi lorsque l'intervalle des fréquences étudiées est considérable. Aux fréquences les plus basses, l'échauffement doit déjà être suffisant pour que la lecture au thermomètre se fasse avec assez de précision ; pour les hautes fréquences, il ne doit pas être exagéré, sans quoi les qualités du diélectrique pourraient se trouver modifiées ; pratiquement, il doit rester compris entre 0,1 et 1 degré.

Pour ramener l'échauffement à une valeur convenable, on peut évidemment agir sur la tension ; je n'ai pas procédé ainsi, craignant que ces variations de tension n'aient quelque influence sur l'angle de perte. J'ai préféré modifier la durée de l'essai ou la capacité calorifique du condensateur ; j'obtenais ce dernier résultat en remplissant plus ou moins le tube de liquide ou en remplaçant l'eau par du pétrole ; naturellement, l'étalonnage était alors à recommencer.

La source de courant était un alternateur pour 900 p:s, un générateur à lampes pour les autres fréquences.

La tension était mesurée à l'électromètre, l'intensité au thermocouple ou à l'ampèremètre thermique.

Mon ondemètre permettait des lectures directes entre $\lambda = 1\,000\text{ m}$ ($f = 300\,000\text{ p:s}$) et $\lambda = 2\,500\text{ m}$ ($f = 120\,000\text{ p:s}$) en lui adjoignant deux capacités supplémentaires, je pouvais l'amener à la résonance pour $\lambda = 5\,000\text{ m}$ ($f = 60\,000\text{ p:s}$) et $\lambda = 7\,000\text{ m}$ ($f = 43\,000\text{ p:s}$) ; je ne pouvais utiliser cet appareil pour $\lambda = 23\,000\text{ m}$ ($f = 12\,600\text{ p:s}$) et j'ai dû construire de toutes pièces un circuit de contrôle. Les fréquences 60 000 et 43 000 p:s ont été étalonnées sur les émissions de la Tour Eiffel, celle de 12 600 p:s sur celles de Bordeaux-Croix d'Hins.

Entre 300 000 et 120 000 p:s, le condensateur étudié était seul en circuit et sa capacité déterminait la longueur d'onde ; dans les autres cas, la fréquence m'était fixée à l'avance et, pour l'obtenir, je doublais le condensateur étudié d'une capacité variable.

Il faut remarquer que dans cette méthode (au contraire de ce qui a lieu au pont et dans la méthode de résonance), la fréquence n'a pas besoin d'être connue avec une grande précision.

Je n'ai pu opérer sur les mêmes condensateurs que précédemment, à cause de l'intensité considérable qu'ils auraient absorbée pour ces fréquences ; ceux que j'ai étudiés avaient une capacité environ mille fois plus faible. Ils m'ont donné les résultats suivants :

CIRE					
	Fréquence p:s	Tension volts	Intensité ampères	Durée minutes	Echauffement degrés
Essais	900	640	0,00182	20	0°24
	12 600	450	0,0178	4	0°157
	143 000	465	0,205	4	1°14
Etalonnages	continu	0,287	0,035	20	0°25
	continu	1,25	0,150	4	1°03
Résultats	Pour $f = 900$ p:s $\sin \alpha = \frac{0,24}{0,25} \times \frac{0,287}{640} \times \frac{0,035}{0,00182} = 0,0083$				
	Pour $f = 12\,600$ p:s $\sin \alpha = \frac{0,157}{1,03} \times \frac{1,25}{450} \times \frac{0,150}{0,0178} = 0,0036$				
	Pour $f = 143\,000$ p:s $\sin \alpha = \frac{1,14}{1,03} \times \frac{1,25}{465} \times \frac{0,150}{0,205} = 0,0022$				

MICA

(La capacité calorifique, réduite au minimum pour $f = 900$ p:s et pour $f = 12\,600$ p:s a été augmentée pour $f = 152\,000$ p:s).

	Fréquence p:s	Tension volts	Intensité ampères	Durée minutes	Echauffement degrés
Essais	900	450	0,00179	30	0°144
	12 600	655	0,0366	6	0°71
	152 000	660	0,435	2	1°18
Etalonnages	continu	0,147	0,0173	30	0°22
	continu	0,553	0,065	6	0°66
	continu	1,70	0,201	2	1°08
Résultats	Pour $f = 900$ p:s $\sin \alpha = \frac{0,144}{0,22} \times \frac{0,147}{450} \times \frac{0,0173}{0,00179} = 0,00206$				
	Pour $f = 12\,600$ p:s $\sin \alpha = \frac{0,71}{0,66} \times \frac{0,553}{655} \times \frac{0,065}{0,0366} = 0,0016$				
	Pour $f = 152\,000$ p:s $\sin \alpha = \frac{1,18}{1,08} \times \frac{1,70}{660} \times \frac{0,201}{0,435} = 0,0013$				

TOILE HUILÉE

(légèrement séchée. La capacité calorifique a été augmentée pour la fréquence 242 000 p:s).

	Fréquence p:s	Tension volts	Intensité ampères	Durée minutes	Echauffement degrés
Essais	900	193	0,000475	15	0°173
	12 600	178	0,0061	15	1°61
	242 000	169	0,108	2	1°14
Etalonnages	continu	0,191	0,0462	15	0°275
	continu	1,68	0,405	2	1°04
Résultats	Pour $f = 900$ p:s $\sin \alpha = \frac{0,173}{0,275} \times \frac{0,191}{193} \times \frac{0,0462}{0,000474} = 0,061$				
	Pour $f = 12\,600$ p:s $\sin \alpha = \frac{1,61}{0,275} \times \frac{0,191}{178} \times \frac{0,0462}{0,0061} = 0,0475$				
	Pour $f = 242\,000$ p:s $\sin \alpha = \frac{1,14}{1,04} \times \frac{1,68}{169} \times \frac{0,405}{0,108} = 0,041$				

PRESSPAHN

(Séché à l'étuve. La capacité calorifique a été réduite au minimum pour les fréquences 900 et 12 600 p:s ; elle a été augmentée pour la fréquence 227 000 p:s).

	Fréquence p:s	Tension volts	Intensité ampères	Durée minutes	Echauffement degrés
Essais	900	423	0,000703	15	0°112
	12 600	408	0,0094	15	1°38
	227 000	375	0,152	2	1°29
Etalonnages	continu	0,208	0,0225	15	0°135
	continu	2,45	0,268	2	1°17
Résultats	Pour $f=900$ p:s $\sin \alpha = \frac{0,112}{0,135} \times \frac{0,208}{423} \times \frac{0,0225}{0,000703} = 0,0133$				
	Pour $f=12\,600$ p:s $\sin \alpha = \frac{0,135}{1,30} \times \frac{0,208}{408} \times \frac{0,0225}{0,0094} = 0,0132$				
	Pour $f=227\,000$ p:s $\sin \alpha = \frac{1,29}{117} \times \frac{2,45}{375} \times \frac{0,268}{0,152} = 0,0127$				

VERRE

(Tube à essai, armature interne en mercure, armature externe en papier d'étain).

	Fréquence p:s	Tension volts	Intensité ampères	Durée minutes	Echauffement degrés
Essais	900	265	0,00072	15	0°122
	60 000	208	0,0378	2	0°325
	12 600	223	0,00855	2	0°115
	193 000	210	0,121	2	0°895
Etalonnages	continu	0,26	0,0355	15	0°142
	continu	1,84	0,253	2	0°98
Résultats	Pour $f=900$ p:s $\sin \alpha = \frac{0,122}{0,112} \times \frac{0,26}{265} \times \frac{0,0355}{0,00072} = 0,042$				
	Pour $f=12\,600$ p:s $\sin \alpha = \frac{0,115}{0,98} \times \frac{1,84}{223} \times \frac{0,253}{0,00855} = 0,0285$				
	Pour $f=60\,000$ p:s $\sin \alpha = \frac{0,325}{0,98} \times \frac{1,84}{208} \times \frac{0,253}{0,0378} = 0,0197$				
	Pour $f=193\,000$ p:s $\sin \alpha = \frac{0,895}{0,93} \times \frac{1,84}{210} \times \frac{0,253}{0,121} = 0,0168$				

PAPIER CIRÉ

	Fréquence p:s	Tension volts	Intensité ampères	Durée minutes	Echauffement degrés
Essais	900	218	0,00076	8	0°217
	12 600	178	0,0077	2	0°128
	43 000	185	0,0260	2	0°285
	205 000	172	0,115	2	0°75
Etalonnages	continu	0,304	0,062	8	0°188
	continu	1,05	0,215	2	0°58
Résultats	Pour $f=900$ p:s $\sin \alpha = \frac{0,217}{0,188} \times \frac{0,304}{218} \times \frac{0,062}{0,00076} = 0,131$				
	Pour $f=12\,600$ p:s $\sin \alpha = \frac{0,128}{0,58} \times \frac{1,05}{185} \times \frac{0,215}{0,0077} = 0,0365$				
	Pour $f=43\,000$ p:s $\sin \alpha = \frac{0,285}{0,58} \times \frac{1,05}{185} \times \frac{0,215}{0,0260} = 0,023$				
	Pour $f=205\,000$ p:s $\sin \alpha = \frac{0,75}{0,58} \times \frac{1,05}{172} \times \frac{0,215}{0,115} = 0,0148$				

CAOUTCHOUC

	Fréquence p:s	Tension volts	Intensité ampères	Durée minutes	Echauffement degrés
Essais	900	254	0,00087	15	0°152
	12 600	263	0,0125	2	0°23
	43 000	248	0,0392	2	0°495
	143 000	236	0,123	2	1°34
Etalonnages	continu	0,270	0,0445	15	0°197
	continu	1,95	0,325	2	1°42
Résultats	Pour $f=900$ p:s $\sin \alpha = \frac{0,152}{0,197} \times \frac{0,270}{254} \times \frac{0,0445}{0,00087} = 0,0417$				
	Pour $f=12\,600$ p:s $\sin \alpha = \frac{0,23}{1,42} \times \frac{1,95}{263} \times \frac{0,325}{0,0125} = 0,315$				
	Pour $f=43\,000$ p:s $\sin \alpha = \frac{0,495}{1,42} \times \frac{1,95}{247} \times \frac{0,325}{0,0392} = 0,0228$				
	Pour $f=143\,000$ p:s $\sin \alpha = \frac{1,34}{1,42} \times \frac{1,95}{236} \times \frac{0,325}{0,123} = 0,0206$				

BUVARD
(humidité du laboratoire)

	Fréquence p:s	Tension volts	Intensité ampères	Durée minutes	Echauffement degrés
Essais	900	183	0,00047	15	0°245
	12 600	161	0,00525	2	0°145
	60 000	164	0,0233	2	0°495
	288 000	148	0,093	2	1°19
Etalonnages	continu	0,285	0,048	15	0°185
	continu	2,05	0,345	2	1°25
Résultats	Pour $f=900$ p:s $\sin \alpha = \frac{0,245}{0,185} \times \frac{0,285}{183} \times \frac{0,048}{0,00047} = 0,211$				
	Pour $f=12\,600$ p:s $\sin \alpha = \frac{1,19}{1,25} \times \frac{2,05}{148} \times \frac{0,345}{0,00325} = 0,0955$				
	Pour $f=60\,000$ p:s $\sin \alpha = \frac{0,495}{1,25} \times \frac{2,05}{164} \times \frac{0,345}{0,233} = 0,072$				
	Pour $f=288\,000$ p:s $\sin \alpha = \frac{0,145}{1,25} \times \frac{2,05}{161} \times \frac{0,345}{0,093} = 0,049$				

E. *Très haute fréquence.* — Enfin, j'ai effectué quelques mesures à très haute fréquence ; ne pouvant, dans ces conditions, mesurer commodément la tension, j'ai dû abandonner la méthode calorimétrique et opérer par résonance. Pour diminuer les erreurs systématiques, j'ai adopté un montage aussi simple que possible.

Les ondes étaient produites par une lampe à trois électrodes dans les circuits de laquelle la capacité et l'inductance avaient été réduites au minimum. Deux fils parallèles couplés lâchement avec cet oscillateur, étaient le siège de phénomènes stationnaires qui permettaient de déterminer la longueur d'onde.

Le circuit de mesure consistait essentiellement en un cadre A B C D de 12 cm de côté (fig. 32 bis). Entre A et B étaient inter-

calés en c tantôt le condensateur à étudier, tantôt un étalon à air ; le côté BC contenait une lampe à incandescence sensible à une fraction de volt ; enfin, le côté AD était démontable et pouvait être remplacé par une résistance r formé d'un fil rectiligne de maillechort de 0,03 mm de diamètre soudé à 2 gros fils de cuivre.

Pour faire une mesure, je réunissais A et D par un gros fil de cuivre, j'introduisais en c le condensateur à étudier et je faisais varier ses dimensions jusqu'à obtenir la résonance ; la lampe prenait alors un certain éclat que je repérais avec une lampe identique alimentée par un accumulateur à travers un rhéostat réglable. Ensuite, *sans changer le couplage*, je remplaçais le condensateur étudié par le condensateur à air dont je réglais la capacité pour obtenir à nouveau la résonance. Enfin, en intro-

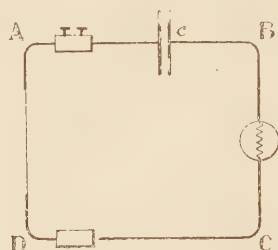


Fig. 32 bis.

duisant dans le côté AD une résistance convenable r , j'arrivais par tâtonnements à donner à la lampe le même éclat que dans la première opération.

Dans ces conditions, l'angle de perte est donné par la relation : $\operatorname{tg} \alpha = cr\omega$. Je n'ai pas cherché à déterminer d'une manière systématique les pouvoirs inducteurs ; je me suis borné à vérifier qu'ils étaient de l'ordre de grandeur prévu.

Pour des fréquences aussi élevées, il est évidemment illusoire de compter sur une grande précision ; le skin effect en particulier est de l'ordre de 10 pour cent avec les résistances employées. Malgré cela, on peut effectuer d'intéressantes mesures relatives.

	c farads	λ mètres	r ohms	$\operatorname{tg} \alpha$
Toile huilée	$1,05 \cdot 10^{-11}$	4,65	8	0,035
Caoutchouc	$1,05 \cdot 10^{-11}$	4,65	12	0,05
Ebonite	$1,10 \cdot 10^{-11}$	4,70	5	0,025

Les angles de perte correspondant à cette fréquence sont de l'ordre de grandeur de ceux que j'avais obtenus pour les fréquences utilisées en radiotélégraphie.

J'ai étudié ensuite quelques liquides :

	c farads	λ mètres	r ohms	$\lg \alpha$
Eau distillée ordinaire	$1,10 \cdot 10^{-11}$	4,70	4	0,02
Eau de la ville	$1,05 \cdot 10^{-11}$	4,65	25	0,12
Glacé d'eau de la ville	$1,05 \cdot 10^{-11}$	4,65	18	0,09
Alcool ordinaire	$1,05 \cdot 10^{-11}$	4,65	11	0,05
Nitrobenzine	$1,05 \cdot 10^{-11}$	4,70	3	0,015

Ces mesures ont été complétées par un essai en courant continu sous 340 volts. Voici les résistances de fuite obtenues et les angles de perte α' que l'on en déduirait en haute fréquence si les pertes étaient exclusivement dues aux fuites.

	Résistance de fuites	$\lg \alpha'$
Eau distillée ordinaire	38 000	0,006
Eau de la ville	650	0,50
Alcool ordinaire	20 000	0,01
Nitrobenzine	500 000	0,0005

Ces tableaux montrent d'abord que l'eau et l'alcool, même impurs, ne sont pas, pour ces fréquences, de trop mauvais isolants. On y voit également que, pour la nitrobenzine, une viscosité bien nette se superpose à la conductibilité. Enfin, on y remarque ce résultat à première vue paradoxal, que les pertes sont, pour l'eau de la ville, bien inférieures à celles que l'on déduirait de la valeur des fuites mesurées en courant continu ⁽¹⁾ ; cela provient, semble-t-il, de ce que la conductibilité des électrolytes diminue quand la fréquence augmente, le mouvement des ions n'étant pas instantané ⁽²⁾.

Des considérations théoriques sur lesquelles je reviendrai m'ont amené ensuite à faire quelques expériences sur la glycérine.

Les premiers essais m'ont montré que les condensateurs à glycérine n'entraient que difficilement en résonance et m'ont donné comme résultat :

$$c = 1,05 \cdot 10^{-11} \text{ farads} \quad \lambda = 4,70 \text{ mètres} \quad r = 900 \text{ ohms} \quad \lg \alpha = 0,43.$$

Pour vérifier l'existence de ces pertes énormes, j'ai fait des mélanges à proportions variables d'eau et de glycérine.

Proportion de glycérine en centièmes	c farads	λ mètres	r ohms	$\lg \alpha$
50	$1,05 \cdot 10^{-11}$	4,70	25	0,125
80	$1,05 \cdot 10^{-11}$	4,70	40	0,20
95	$1,05 \cdot 10^{-11}$	4,70	65	0,32

Ces résultats confirment le précédent.

⁽¹⁾ Il y a lieu de remarquer que les capacités qui interviennent dans le calcul de ces deux angles de perte ne correspondent pas à la même définition.

⁽²⁾ ANDRÉ BROCA et TURCHINI (*Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences*, 1901, t. CXXXII, p. 915) ont montré que pour des fréquences suffisantes (10^6), on peut obtenir dans des électrolytes des étincelles tout comme dans les diélectriques.

En courant continu, le condensateur étudié avait une résistance de 2 300 000 ohms ; ces fuites correspondaient à un angle de perte défini par $\operatorname{tg} \alpha = 0,0001$.

Enfin, j'ai fait un essai à une fréquence relativement faible, pour $\lambda = 1\,800$ m. Alors que l'eau et l'alcool étaient, par suite

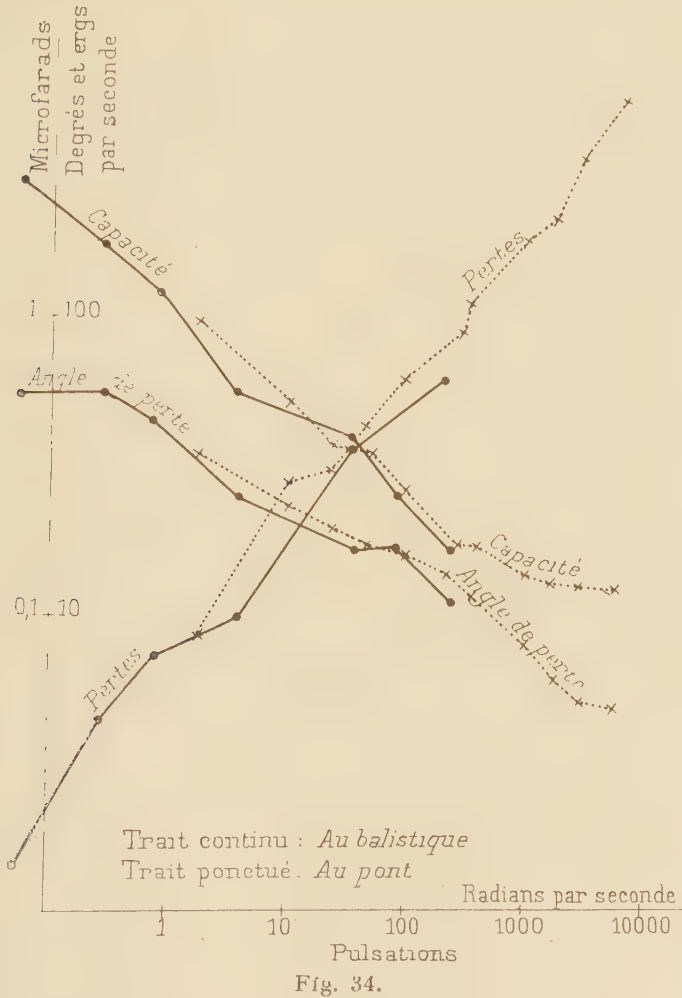


Fig. 33.

de leur conductibilité, tellement absorbants qu'il était impossible de mettre en évidence la moindre résonance, la glycérine permettait d'obtenir une résonance particulièrement nette et son angle de perte était défini par $\operatorname{tg} \alpha = 0,025$.

Ainsi, la glycérine qui se comporte généralement comme un très bon isolant présente, pour des longueurs d'onde de quelques mètres, une région d'absorption tout à fait nette.

F. Conclusion. — Les résultats les plus intéressants sont, à mon avis, ceux qu'a donnés la méthode du balistique, parce qu'ils se

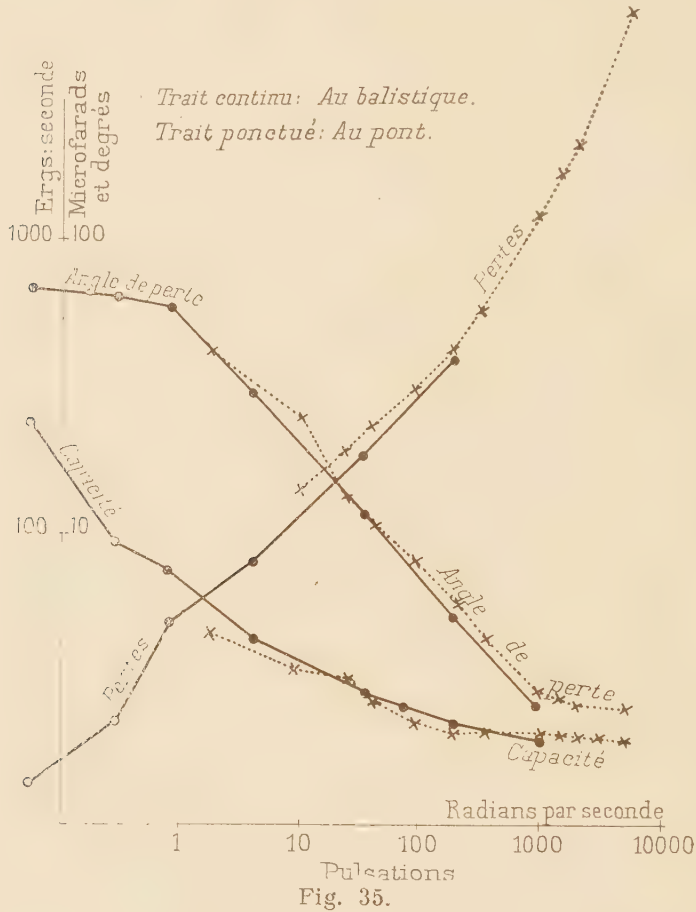


rapportent aux pertes par viscosité pure. J'ai représenté sur la figure 33 les cycles obtenus ; leur aspect montre sans aucune ambiguïté que la perte par cycle décroît constamment lorsque la fréquence augmente.

Pour dégager des résultats une loi générale, j'ai représenté sur les figures 34 et 35 ceux qui sont relatifs aux condensateurs n° 2

et 12, en adoptant des coordonnées logarithmiques pour faciliter les lectures aux basses fréquences.

On voit en premier lieu que les résultats obtenus au pont ne sont pas très différents, en général, de ceux que fournit le balistique, de sorte que la perte due aux fuites apparaît comme négli-



geable ; dans les quelques cas où l'écart entre leurs valeurs est notable, c'est que l'une des deux méthodes est à la limite de sa sensibilité. Pour des cycles très aplatis par exemple, on ne peut mesurer l'angle de perte au balistique qu'avec une faible approximation ; par contre, aux basses fréquences, l'équilibre ne peut être obtenu au pont que d'une manière approchée.

En coordonnées logarithmiques, les courbes représentatives des pertes sont sensiblement rectilignes ; elles peuvent donc être représentées par des relations de la forme $W = M \omega^n$ où M et n

sont des constantes. L'exposant n prend la valeur 0,5 pour le condensateur n° 2 et la valeur 0,6 pour le n° 12 ; la puissance absorbée par ces deux mauvais condensateurs croît donc bien moins vite que la fréquence. La surface du cycle de viscosité et l'angle de perte diminuent rapidement lorsque la fréquence augmente ; ces condensateurs sont donc d'autant meilleurs que la fréquence est plus élevée.

La capacité varie en sens inverse de la fréquence, mais suivant une loi plus compliquée. Pour des fréquences très basses, lorsque les résidus sont énormes, la courbe représentative est sensiblement rectiligne, mais elle s'infléchit peu à peu à mesure que la fréquence augmente. On obtient un résultat beaucoup plus simple en représentant non plus la capacité totale, mais seulement la capacité résiduelle ; la courbe représentative est alors une droite dont le coefficient angulaire est sensiblement $n-1$. La capacité totale peut donc être représentée par l'expression suivante : $C = C_0 - N \omega^{n-1}$.

Le sinus de l'angle de perte, qui est proportionnel au quotient des pertes par le courant est alors de la forme : $\sin \alpha = \frac{A}{B + C_0 \omega^{1-n}}$.

Lorsque la fréquence devient de plus en plus basse, C_0 est pour de mauvais condensateurs négligeable devant B , de sorte que l'angle de perte par viscosité tend vers une limite ; naturellement, l'angle de pertes totales tend vers $\frac{\pi}{2}$.

Le condensateur n° 4 semble faire exception aux lois précédentes. Pour les fréquences moyennes et basses, il ne se distingue pas des autres, mais, aux environs de $\omega = 2\,000$, son angle de perte passe par un minimum. Un essai spécial fait à $\omega = 16\,500$ m'a confirmé ce résultat. J'ai pensé que cette anomalie pouvait provenir de la résistance des armatures et, pour vérifier cette hypothèse, j'ai, à la fin des expériences, démonté les condensateurs n°s 2 et 4. J'ai effectivement constaté que les bornes du condensateur n° 2 étaient réunies en divers points aux armatures, tandis que ces connexions n'existaient pas pour le condensateur n° 4 ; les armatures de ce dernier, constituées par une feuille d'étain de 4,50 m de long sur 2 cm de large et $\frac{1}{100}$ mm d'épaisseur, avaient une résistance totale de 2,4 ohms, ce qui suffit pour expliquer la recrudescence de l'angle de perte aux fréquences élevées.

Au début de la haute fréquence, les résultats précédents sub-

sistent en général, comme le montre la fig. 36. L'angle de perte est sensiblement indépendant de la fréquence pour le presspahn et la toile huilée ; il décroît au contraire nettement pour le buvard, le papier ciré et la cire. Mes mesures en haute fréquence ne sont pas, d'ailleurs, assez précises pour que l'on puisse en déduire suivant quelle loi varie la capacité ; elles montrent cependant que, sauf pour le buvard et le papier ciré, cette variation ne dépasse pas 5 pour 100.

Enfin, à très haute fréquence, apparaît, pour la glycérine en particulier, un phénomène tout à fait distinct soumis à des règles entièrement différentes.

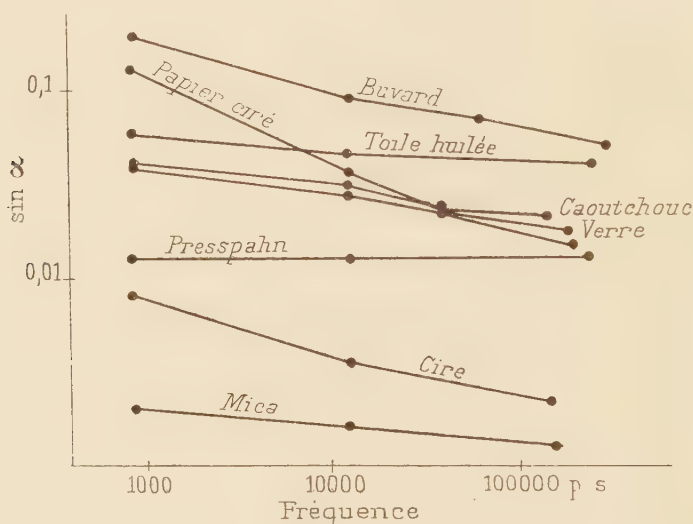


Fig. 36.

Les lois précédentes ne doivent être considérées que comme une première approximation, largement suffisante d'ailleurs. Il ne semble pas possible de représenter les pertes par des formules plus précises sans qu'elles cessent d'être générales. Pour certains corps même, comme la gutta, les pertes varient tellement suivant l'échantillon étudié et les traitements thermiques antérieurs, qu'il semble illusoire de vouloir les représenter mathématiquement.

II. INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE. — A. Généralités. — Parmi les causes qui font varier les propriétés des diélectriques imparfaits, l'action de la température est une des plus importantes ; elle a été étudiée en particulier par Fleming et Dicke (pont, fré-

quence téléphonique) ; Skinner (wattmètre électrostatique, basse fréquence), Swingedauw, Renesson, Frigon (wattmètre électrodynamique, basse fréquence) ; Schott ⁽¹⁾ (résonance, haute fréquence). Il ressort de leurs expériences que, en général, les pertes sont une fonction rapidement croissante de la température. Toutefois, pour le caoutchouc, la gutta et la résine, il existe un minimum plus ou moins net.

La principale difficulté rencontrée provient de ce qu'un diélectrique chauffé puis refroidi ne revient pas à son état initial. Il ne faut pas entendre par là qu'il existe dans tous les cas une hystérésis véritable dans l'action de la température, car les modifications du diélectrique sont dues à des causes trop complexes; j'ai constaté en particulier les suivantes :

1° Dans le verre, corps en surfusion, l'arrangement moléculaire après chauffage ne revient que lentement à son état primitif ; on connaît d'ailleurs depuis longtemps le déplacement du zéro des thermomètres. J. Curie a montré aussi que la capacité d'un condensateur à verre sous tension constante est plus grande après la chauffe qu'avant.

2° Dans un condensateur à papier paraffiné, lorsqu'on arrive aux environs de 110° on constate ordinairement une ébullition quelquefois tumultueuse ; l'humidité du diélectrique s'échappe et, après refroidissement, le condensateur est bien meilleur qu'auparavant.

3° Dans les condensateurs à armatures de clinquant et diélectriques organiques, il y a quelquefois attaque chimique fort nette; le sel de cuivre formé se répand dans la masse et détermine une augmentation des pertes.

4° Enfin, quand le chauffage détermine dans le diélectrique un changement d'état, il se produit des dilatations ou des compressions de sorte que les dimensions géométriques peuvent être modifiées si les armatures ne sont pas rigides.

C'est surtout la première fois que le diélectrique est chauffé, que ses propriétés se modifient. Par exemple, un condensateur à papier paraffiné avait primitivement à 22° et à 25 p:s un angle de perte dont la tangente était 0,38 ; après 2 heures de chauffe à 110° cette quantité est tombée à 0,05 ; après 3 chauffages successifs, elle est remontée à 0,08.

(1) SCHOTT. *Zeitschrift für Drahtlose Telegraphie*. Band 18, p. 62, 1921.

Avant tout essai électrique, on doit donc faire subir au condensateur plusieurs chauffages successifs, identiques comme durée et température à ceux que l'on utilisera pour les mesures. Il faut en outre chauffer lentement, les diélectriques étant mauvais conducteurs de la chaleur, pour être sûr que toute la masse est à la même température. Enfin, si l'on doit comparer les résultats obtenus pour des fréquences ou des tensions différentes, on doit, autant que possible, faire les mesures pendant le même essai.

B. *Condensateurs à papier imprégné.* — J'exposerai d'abord les expériences faites sur des condensateurs à papier imprégné. Leur capacité considérable m'a permis de les étudier à basse fréquence ; j'en ai profité pour comparer entre elles les méthodes du pont, du wattmètre et du balistique.

1° Les premiers essais ont été faits au pont de Wien ; les condensateurs étaient chauffés à l'étuve et la température était maintenue constante pendant une heure avant les mesures. Celles-ci m'ont montré que les pertes étaient une fonction rapidement croissante de la température. Cette augmentation est due à la fois à un accroissement de l'angle de perte et à un accroissement de la capacité. Voici les chiffres obtenus (R' et R'' représentent les bras du pont, r et C' la résistance et la capacité de comparaison, C la capacité étudiée, α l'angle de pertes totales, P_a pertes totales correspondant à 1 volt efficace, et ω la pulsation en radians par seconde) :

CONDENSATEUR N° 2 (papier paraffiné)					
1 ^{re} série ($\omega = 33$ $R = 10\,000$ ohms $C' = I_{\mu F}$)					
Température	R' ohms	r ohms	C microfarads	$\lg \alpha$	P_a ergs/sec.
— 7°	2 300	10 900	0,23	0,39	27
8°	2 720	11 800	0,27	0,42	35
20°	3 300	14 000	0,33	0,46	41,5
32°	4 200	16 500	0,42	0,54	57,5
44°	7 800	30 000	0,78	1	130
50°	9 000	35 000	0,90	1,15	146
2 ^{me} série ($\omega = 140$ $R' = 1\,000$ ohms $C' = I_{\mu F}$)					
— 7°	170	2 200	0,17	0,31	70
8°	230	2 570	0,23	0,36	103
20°	280	3 050	0,28	0,425	140
32°	485	3 600	0,367	0,505	270
44°	690	6 920	0,69	0,97	490
50°	800	7 100	0,80	1	550

CONDENSATEUR N° 3 (papier paraffiné)

1^{re} série ($\omega = 33$ $R = 1\,000$ ohms $C' = I \mu F$)

Température	R' ohms	r ohms	C microfarads	$\text{tg } \alpha$	P_a ergs:sec.
— 6°	110	10 500	0,11	0,35	11,5
14°	240	23 000	0,24	0,76	37,5
21°	380	32 000	0,38	1,05	62
38°	850	70 000	0,85	2,30	102
55°	5 300	110 000	5,3	3,63	445

2^{me} série ($\omega = 140$ $R = 1\,000$ ohms $C' = I \mu F$)

Température	R' ohms	r ohms	C microfarads	$\text{tg } \alpha$	P_a ergs:sec.
— 6°	82	1 950	0,08	0,27	28
14°	155	3 600	0,155	0,505	87
21°	225	6 090	0,225	0,86	155
38°	575	13 000	0,575	1,82	335
55°	3 800	22 700	3,8	3,2	1 520

CONDENSATEUR N° 17 (papier ciré)

1^{re} série ($\omega = 33$ $R = 1\,000$ ohms $C' = I \mu F$)

Température	R' ohms	r ohms	C microfarads	$\text{tg } \alpha$	P_a ergs:sec.
— 6°	620	6 700	0,62	0,22	39
14°	710	9 600	0,71	0,31	62
21°	870	12 100	0,87	0,40	98
38°	1 250	20 000	1,25	0,66	188
55°	3 950	38 000	3,95	1,25	582

2^{me} série ($\omega = 140$ $R = 1\,000$ ohms $C' = I \mu F$)

Température	R' ohms	r ohms	C microfarads	$\text{tg } \alpha$	P_a ergs:sec.
— 6°	455	1 280	0,455	0,18	115
14°	605	2 020	0,60	0,28	220
21°	730	2 600	0,73	0,365	325
38°	1 165	4 190	1,165	0,59	725
55°	2 550	8 090	2,55	1,13	1 550

2° Lorsque la température s'approche de celle de fusion, les pertes augmentent plus rapidement encore. Je me suis proposé de voir d'une manière plus précise ce qui se passe au moment de la fusion. Comme les essais précédents m'avaient montré les difficultés que présente le réglage du pont pour des angles de perte excessifs (¹), j'ai préféré mesurer d'abord du wattmètre les puissances actives P_a et réactive P_r .

Voici les résultats obtenus pour le condensateur n° 2 :

(¹) En se rapportant à la figure 24, on voit que les deux cercles dont l'intersection détermine les conditions d'équilibre du pont, se coupent sous un angle très aigu.

CONDENSATEUR N° 2 (wattmètre)

1^{re} série ($\omega = 38$)

Température	P_a ergs:sec. sous 1 volt	P_r ergs:sec. sous 1 volt	$\lg z$
— 3°	5,6	62	0,09
10°	7,2	65	0,11
22°	7,8	65	0,12
35°	10,3	68	0,15
48°	14,4	72	0,20
52°	40	125	0,32
56°	92	205	0,45
62°	450	320	1,40
70°	570	332	1,75
80°	660	330	2
92°	1 020	330	3,1
103°	1 350	340	4

2^{me} série ($\omega = 157$)

— 3"	16	212	0,075
10"	19,3	215	0,09
22°	20,8	208	0,10
35°	25,5	214	0,12
48°	28	242	0,15
52°	65	285	0,23
56°	115	350	0,32
62°	560	405	1,4
70°	685	415	1,65
80°	830	405	2,05
92°	1 150	410	2,80
103°	1 520	420	3,60

3° Ces résultats montrent encore que les pertes croissent très rapidement avec la température, mais ils permettent aussi de faire quelques remarques intéressantes :

La puissance réactive reste sensiblement constante ou en tout cas ne croît que très lentement avant et après la fusion ; pendant celle-ci, elle augmente brusquement.

Avant la fusion, les puissances active et réactive dépendent beaucoup de la fréquence et on peut même dire en première approximation qu'elles lui sont proportionnelles ; après la fusion, elles en sont presque indépendantes.

De la première de ces remarques, il résulte que la capacité calculée par la formule $C = \frac{P_r}{\omega}$ semble dans cet essai ne croître

que très lentement après la fusion. Ce résultat m'ayant paru suspect et en contradiction avec les mesures d'autres auteurs, j'ai opéré sur des condensateurs différents : les résultats ont persisté.

J'ai alors incriminé le dispositif employé ; pour savoir si l'erreur provenait d'un choix défectueux des appareils de mesure ou encore des conditions de l'expérience, j'ai comparé la méthode du wattmètre à celle du pont. Comme on s'en rendra compte dans les tableaux ci-après relatifs au condensateur n° 10, les résultats sont sensiblement d'accord pour l'angle de perte, mais sont tout à fait en contradiction en ce qui concerne la capacité. A 100° , par

exemple, pour $\omega = 41$, on trouve par interpolation $C = \frac{P_r}{\omega} = 3,4$

au wattmètre et $C = \frac{C' R'}{R} = 45$ au pont.

Pourtant, les deux méthodes ont donné sensiblement les mêmes valeurs pour les puissances active et réactive ou, ce qui revient au même, pour la valeur maximum du courant et son déphasage. Il ne peut donc y avoir d'erreur expérimentale ; le désaccord ne peut s'expliquer que par une inexactitude théorique. Il est alors

facile de voir que les formules simples utilisées $C = \frac{P_r}{\omega}$ et $C = \frac{C' R'}{R}$

ne correspondent pas aux mêmes hypothèses sur la constitution des diélectriques. Dans la méthode du wattmètre on écrit que toute l'énergie réactive est emmagasinée sous la tension d'alimentation ; dans celle du pont, au contraire, on admet implicitement qu'elle est emmagasinée sous une tension égale à celle qui existe aux bornes du condensateur de comparaison.

On peut essayer des formules plus approchées ; en supposant que les fuites sont négligeables, on obtient la *capacité définie au balistique* en divisant par $\cos \alpha$ le nombre trouvé au wattmètre ou en multipliant par $\cos \alpha$ le nombre obtenu au pont. Aussi, ai-je calculé en même temps que les autres résultats les valeurs de

$\frac{P_r}{\omega \cos \alpha}$ et de $\frac{C' R'}{R} \cos \alpha$; on peut voir que, effectivement, elles sont

peu différentes dans les deux méthodes ; on verra d'ailleurs plus loin qu'elles sont sensiblement égales aux valeurs données par le balistique.

CONDENSATEUR N° 10 au papier paraffiné (wattmètre) (fig. 37)

1^{re} série ($\omega = 41$)

Température	P_a	P_r	$\lg \alpha$	$\frac{P_r}{\omega}$	$\frac{P_r}{\omega \cos \alpha}$
degrés	ergs:sec.	ergs:sec.		microfarads	microfarads
103°	6 050	1 460	4,15	3,56	15,2
88°	3 950	1 235	3,2	3,02	10,1
73°	2 200	1 050	2,1	2,56	6
64°	1 550	1 030	1,5	2,50	4,6
58°	900	855	1,05	2,08	3,03
54°	580	810	0,72	1,98	2,45
50°	230	510	0,45	1,23	1,37
36°	103	410	0,25	1,0	1,26

2^{me} série ($\omega = 157$)

103°	7 600	2 550	3,1	1,62	5,45
91°	6 400	2 650	2,5	1,68	4,65
82°	4 500	2 650	1,8	1,68	3,5
70°	2 800	2 650	1,12	1,68	2,56
64°	2 350	2 480	1,	1,57	2,24
60°	1 550	2 480	0,66	1,57	1,92
54°	1 000	2 250	0,44	1,43	1,52
53°	680	2 400	0,30	1,54	1,6
38°	320	1 700	0,19	1,08	1,08

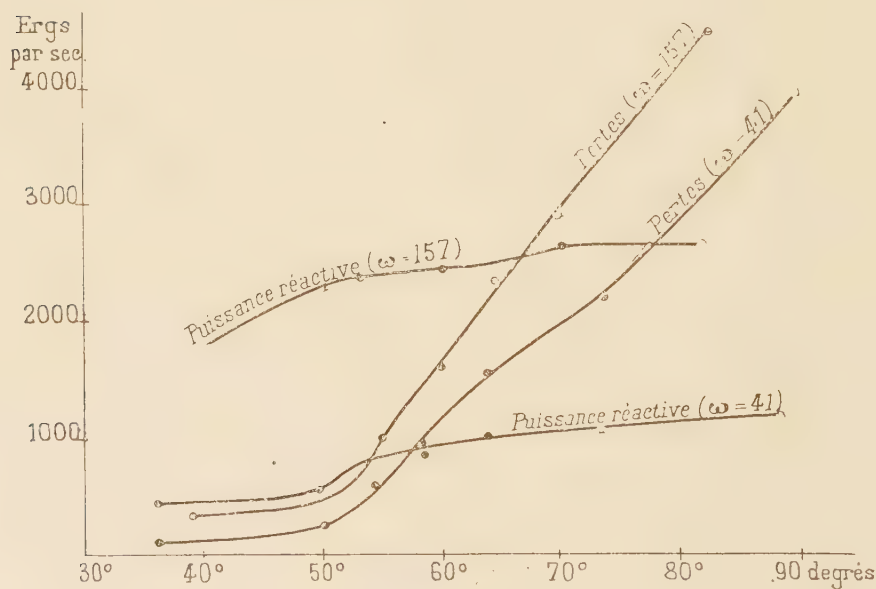


Fig. 37.

CONDENSATEUR N° 10 (au pont)					
1 ^{re} série ($\omega = 42$ $C' = I \mu. F$)					
Température	$\frac{C' R'}{R}$	$\lg \alpha$	P_a	P_r	$\frac{C' R'}{R} \cos \alpha$
degrés	microfarads		ergs:sec	ergs:sec.	microfarads
98°	42,5	3,40	4 800	1 410	11,9
85°	24,2	2,65	3 370	1 270	8,5
76°	16,7	2,30	2 580	1 120	6,7
67°	11,2	1,82	2 000	1 090	5,4
60°	6,5	1,35	1 290	955	3,8
55°	2,82	0,70	500	715	2,3
51°	1,53	0,51	257	505	1,35
42°	1,32	0,29	139	480	1,25
2 ^{ne} série ($\omega = 155$ $C' = I \mu. F$)					
110°	31	3,53	10 300	2 900	11,5
95°	17,7	3,1	8 000	2 600	5,8
86°	10,1	2,4	6 500	2 700	3,8
82°	8,45	1,95	5 300	2 750	3,8
73°	5,85	1,58	4 100	2 600	3,1
60°	2,42	1,04	2 200	2 300	1,67
56°	1,67	0,60	1 150	1 940	1,45
55°	1,45	0,475	880	1 850	1,33
53°	1,28	0,295	530	1 800	1,23
37°	1,23	0,160	269	1 680	1,22

4° Enfin, une dernière question se pose : après la fusion, quelle est la principale cause de pertes, la viscosité ou les fuites ?

Il semble bien que, dans le cas qui nous occupe, l'action de la viscosité soit prépondérante et que le condensateur étudié soit assimilable à un condensateur parfait en série avec une résistance. Les résultats satisfaisants obtenus en faisant cette hypothèse dans la comparaison des différentes méthodes indiquent qu'elle est vraisemblable. Il existe d'ailleurs deux moyens expérimentaux permettant de trancher la question : la décharge directe au balistique et la mesure des fuites en courant continu.

La décharge au balistique devient relativement pénible à haute température. Il faut prendre des précautions spéciales pour éviter la formation de courants continus parasites qui ne gênaient aucunement dans les méthodes du pont et du wattmètre. En outre, comme l'essai dure très longtemps, on peut craindre que le maintien à température élevée ne finisse par modifier la constitution du diélectrique. Néanmoins, cette méthode montre avec une précision plus que suffisante, l'énorme déformation que fait subir au cycle de viscosité l'action de la température. Je donne ici les résultats obtenus avec le condensateur n° 10 déjà étudié. On remarquera que, sans coïncider avec ceux qu'avaient donnés

le pont et le wattmètre, ils ne s'en écartent que peu. En particulier, la valeur de la capacité est du même ordre de grandeur que celle qui a été calculée dans ces deux méthodes par la formule rectifiée.

Voici d'abord pour différentes températures les nombres qui déterminent les cycles : en face des tensions instantanées sont inscrites les quantités d'électricité correspondantes.

CONDENSATEUR N° 10 (Balistique)					
(ω = 150 Tension maximum 93 volts)					
	Volts	Microcoulombs		Volts	Microcoulombs
74°	0 cr.	— 200	65°	— 12 cr.	— 142
	58	— 80		45	— 46
	92 décr.	190		92	140
	73	260		86 décr.	190
	3	210		48	172
	— 33	150		— 4	106
54°	5 cr.	— 55	51°	2 cr.	— 40
	51	32		49	38
	90	126		82	104
	56 décr.	115		90 décr.	132
	— 5	53		50	94
				— 2	34
49°	— 48 cr.	— 78	44°	— 48 cr.	— 80
	15	4		9	— 10
	64	80		62	70
	92 décr.	136		91 décr.	125
	65	100		68	105
	2	22		29	55
				— 20	— 15
12°	10 cr.	10			
	54	76			
	86	119			
	79 décr.	114			
	40	61			
	1	4			

Après avoir tracé les cycles précédents (fig. 38), j'en ai déduit l'angle de perte par viscosité pure α , la capacité définie au balistique $C_{\max}$ en phase avec la tension et C_r , ses composantes C_a en quadrature et enfin les puissances réactive P_r et active P_a correspondant à 1 volt efficace :

Temp.	$C_{\max}$	C_a	$\sin \gamma$	C_r	P_a	P_r
74°	2,83	2,05	0,75	1,7	3 050	2 650
65°	2	1,15	0,58	1,6	1 720	2 420
54°	1,6	0,6	0,37	1,45	900	2 250
51°	1,4	0,4	0,28	1,35	600	2 050
49°	1,4	0,2	0,14	1,33	300	2 000
44°	1,35	0,2	0,15	1,31	300	2 000
12°	1,26	0,02	0,02	1,26	30	1 900

Enfin, j'ai essayé de procéder à la mesure de la résistance en courant continu ; pour cela, j'ai enregistré au balistique la différence entre la quantité d'électricité absorbée pendant un certain

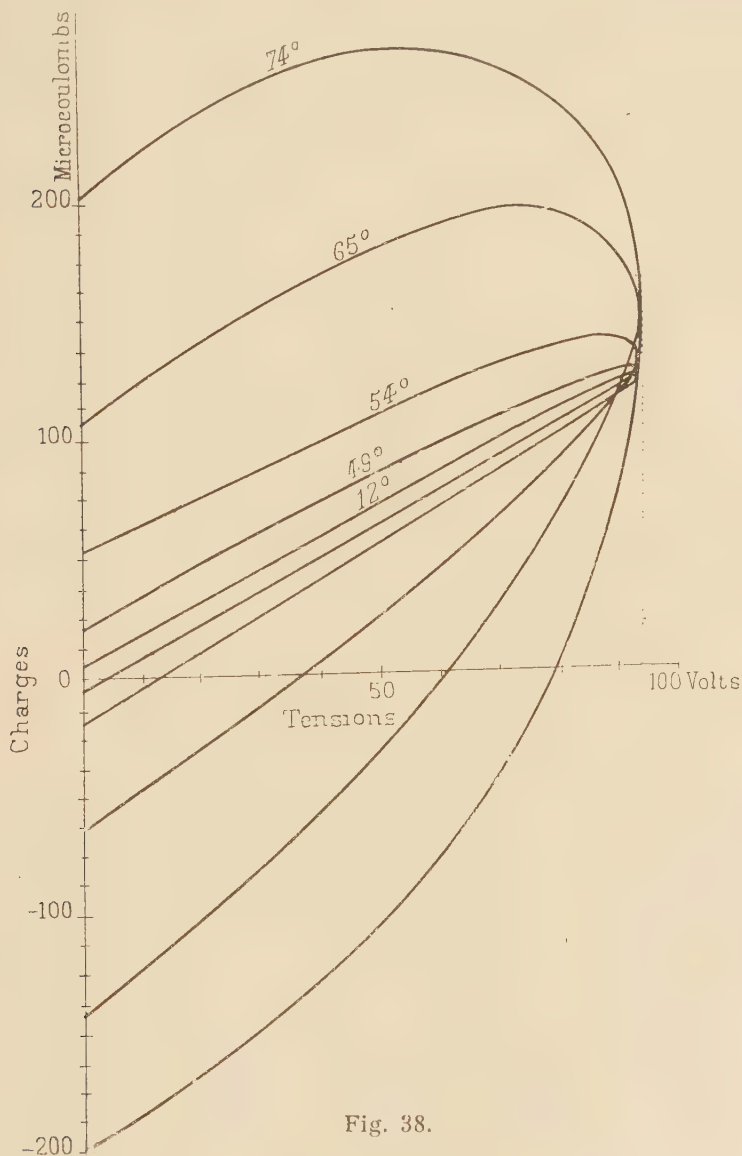


Fig. 38.

temps de charge et celle qui était restituée pendant une décharge consécutive très longue. J'ai obtenu :

35 000 ohms à 85° et 95 000 ohms à 58°.

Il en résulte qu'à 85° la puissance perdue par effet Joule sous 1 volt efficace serait de l'ordre de grandeur de $\frac{1}{35\,000}$ watt ou

300 ergs:seconde, tandis qu'au pont on obtient environ 10 fois plus ; il serait illusoire de pousser plus loin le calcul à cause du peu de précision que donne la mesure de la résistance ; on constate, en effet, qu'à cette température le diélectrique, sous l'action du courant continu, est soumis à une épuration beaucoup plus rapide qu'à froid. Ces résultats montrent cependant nettement que dans le condensateur étudié, les pertes par viscosité sont bien supérieures aux pertes par effet Joule. Cette conclusion n'est évidemment valable que pour les condensateurs à papier paraffiné.

C. *Cable au papier imprégné.* — Dans les expériences précédentes, les pertes croissaient constamment avec la température ; il n'en est pas toujours ainsi. Voici, par exemple, les résultats obtenus sur un câble pour basse tension au papier imprégné ; la matière d'imprégnation paraissait être un mélange d'huiles et de résines. La méthode employée a été celle du pont, modifiée d'après le schéma de la fig. 27. R et R' sont les bras du pont, γ la capacité de compensation, ω la pulsation en radians par seconde.

(Méthode du pont modifié $\omega = 5500$ $R = R' = 10\,000$ ohms)			
Température degrés	γ millimicrofarad	Capacité millimicrofarad	$\text{tg } \alpha$
0°	0,33	1,29	0,018
20°	0,16	1,28	0,009
35°	0,11	1,275	0,006
50°	0,15	1,275	0,008
70°	0,20	1,28	0,011

D. *Verre.* — J'ai étudié un échantillon de verre à fréquence téléphonique au moyen du pont modifié et à haute fréquence par la méthode de résonance.

$(\omega = 5500)$				
Température degrés	$R = R'$ ohms	γ millimicrofarad	Capacité millimicrofarad	$\text{tg } \alpha$
— 15°	2 000	0,25	1,45	0,0027
20°	2 000	0,46	1,45	0,0051
50°	10 000	0,24	1,46	0,013
100°	10 000	0,44	1,48	0,024

$(\omega = 1\,570\,000)$			
Température degrés	R ohms	Capacité millimicrofarad	$\text{tg } \alpha$
— 15°	0,7	1,45	0,0016
20°	1,3	1,45	0,0029
50°	1,75	1,45	0,0040
100°	2,8	1,46	0,0066

Les fuites étaient très faibles ; la résistance d'isolement mesurée en continu était supérieure à 1 000 mégohms pour 100°.

J'ai représenté en coordonnées logarithmiques (fig. 39), la variation de $\text{tg } \alpha$ en fonction de la température absolue ; pour les fréquences étudiées, les courbes obtenues sont deux droites sensiblement parallèles.



Fig. 39.

E. *Huile lourde*. — Les liquides ne se comportent pas de la même manière que les solides ; voici ce que j'ai obtenu avec de l'huile lourde de graissage :

(ω = 5 500) (Pont modifié R — R' = 10 000 ohms)			
Température degrés	γ millimicrofarad	Capacité millimicrofarad	tg α
20°	0,075	1,04	0,004
50°	0,25	1,05	0,014
60°	0,51	1,07	0,028
70°	0,82	1,10	0,046
ω = 1 570 000 (Méthode de résonance)			
Température degrés	R ohms	Capacité millimicrofarad	tg α
20°	0,75	1,04	0,0012
50°	0,75	1,05	0,0012
60°	0,90	1,065	0,0015
70°	1,07	1,08	0,0018

La résistance en courant continu à 50° était de 15 mégohms, ce qui correspond pour $\omega = 5500$ à

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{I}{1,05 \cdot 10^{-9} \cdot 15 \cdot 10^6 \cdot 5,5 \cdot 10^3} = 0,012 \text{ et pour } \omega = 1570000 \text{ à}$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{I}{1,05 \cdot 10^{-9} \cdot 15 \cdot 10^6 \cdot 1,57 \cdot 10^6} = 0,00006.$$

Pour 900 p.s et les fréquences inférieures, les pertes dues aux

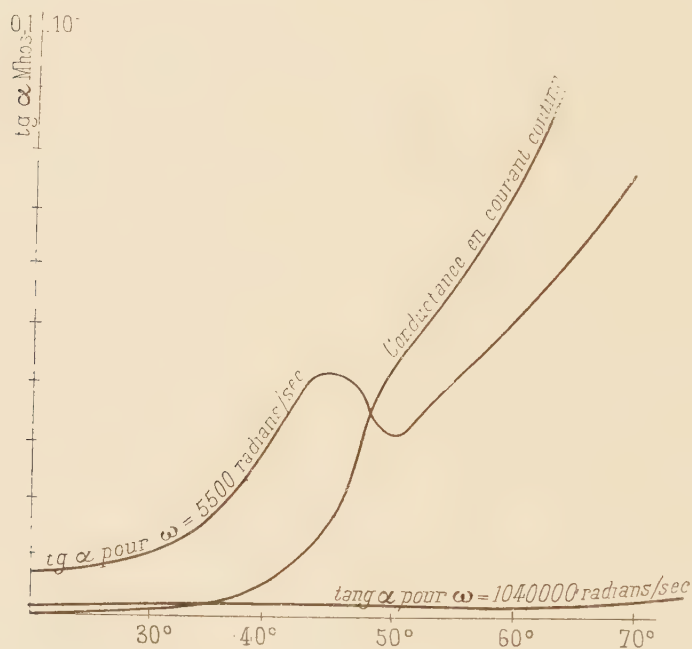


Fig. 40.

fuites sont donc tout à fait prépondérantes ; en haute fréquence, elles sont au contraire négligeables vis-à-vis des pertes par viscosité.

F. Cire. — J'ai étudié précédemment comment se comportait le papier paraffiné et montré que les fuites restaient relativement faibles, même après fusion de la paraffine. L'allure des phénomènes est bien différente pour une substance homogène. Des essais sur la paraffine m'ont donné des résultats trop faibles pour être précis ; avec la cire, j'ai obtenu les nombres suivants (fig. 40) :

($\omega = 5500$) (Pont modifié $R \cdot R' = 10\,000$)

Température degrés	γ millimicrofarad	Capacité millimicrofarad	$\text{tg } \alpha$
22° solide	0,15	0,405	0,0085
35° —	0,31	0,40	0,017
42° —	0,63	0,39	0,0345
45° pâteux	0,75	0,38	0,041
48° —	0,65	0,36	0,036
50° liquide	0,57	0,34	0,0315
55° —	0,76	0,32	0,042
60° —	0,82	0,32	0,049
70° —	1,28	0,35	0,075

$\omega = 1\,040\,000$ (Méthode de résonance)

Température degrés	R ohms	Capacité millimicrofarad	$\text{tg } \alpha$
22° solide	4,9	0,403	0,00205
35° —	5,8	0,40	0,0024
42° —	7	0,39	0,00285
45° pâteux	6,6	0,38	0,0026
48° —	6	0,355	0,0022
50° liquide	5,8	0,33	0,0020
55° —	6,2	0,31	0,0020
60° —	6,2	0,31	0,0020
70° —	6,6	0,33	0,00225

Courant continu

Température degrés	Capacité pour une décharge de $\frac{I}{30^v}$ de sec.	Résistance mégohms
20° solide	0,48	8 700
30° —	0,65	280
35° —	0,74	220
43° —	1	110
46° pâteux	0,052 (*)	55
48° —	0,09	35
50° liquide	0,42	23
60° —	0,35	13
70° —	0,28	8

Ainsi, lorsque le diélectrique devient pâteux, la capacité résiduelle et l'angle de perte augmentent notablement, la conductibilité restant faible ; lorsque le corps devient liquide, les fuites se substituent presque entièrement à la viscosité pour les fréquences téléphoniques, tandis qu'à haute fréquence, la viscosité reste encore très sensible. A 60° par exemple, les fuites seules correspondraient en effet pour $\omega = 5\,500$ à :

(*) A partir de cette température, les nombres trouvés pour la capacité en courant continu ne signifient plus rien ; par suite de l'importance des fuites, une partie considérable de la charge disparaît pendant la commutation. Les essais en alternatif, par contre, montrent que la capacité diminue, par suite de la transformation des résidus en fuites.

$$\lg \alpha = \frac{1}{0,32 \cdot 10^{-9} \cdot 13 \cdot 10^6 \cdot 5,5 \cdot 10^3} = 0,043,$$

$$\text{et pour } \omega = 1\,040\,000 \text{ à } \lg \alpha = \frac{1}{0,31 \cdot 10^{-9} \cdot 13 \cdot 10^6 \cdot 1,04 \cdot 10^6} = 0,00024.$$

G. *Résine*. — L'essai précédent montre que, pour la cire, les pertes croissent avec la température à l'état solide puis à l'état liquide, le passage de l'état pâteux à l'état liquide correspondant au contraire à une diminution brusque de l'angle de perte. Dans l'échantillon de résine que j'ai étudié, probablement parce que l'état liquide parfait n'est jamais atteint, les phénomènes sont différents, les pertes diminuant constamment après la fusion.

$\omega = 1\,570\,000$ (Méth. de résonance)			
Température degrés	R ohms	Capacité millimicrofarad	$\lg \alpha$
20° solide	1,2	1,48	0,0028
40° —	3,5	1,48	0,008
60° pâteux	9	1,49	0,021
80° —	14,5	1,52	0,035
100° —	12	1,53	0,029
120° liquide	8	1,52	0,018

H. *Caoutchouc*. — Il me reste enfin à citer deux corps très intéressants en pratique mais théoriquement bien délicats à étudier : le caoutchouc et la gutta. Ces deux produits, le dernier surtout, possèdent lorsqu'on fait varier la température, une hystérésis mécanique énorme ; leur élasticité et leur dureté sont très variables ; en outre, pour le caoutchouc, les pertes diélectriques sont, comme on le verra plus loin, fortement influencées par la tension mécanique.

Les résultats d'expériences n'ont donc qu'une valeur relative et ne sont pas susceptibles d'une grande précision.

$\omega = 5\,590$ (Pont modifié. $R = R' = 2\,000$ ohms)			
Température degrés	γ millimicrofarad	Capacité millimicrofarad	$\lg \alpha$
— 20°	1,05	1,465	0,0115
— 10°	0,64	1,45	0,007
0°	0,41	1,435	0,0045
10°	0,27	1,43	0,03
20°	0,21	1,42	0,0023
30°	0,28	1,42	0,0031
40°	0,32	1,43	0,0035
50°	0,43	1,445	0,0047

$\omega = 1\,570\,000$ (Méthode de résonance)			
Température degrés	Capacité millimicrofarad	R ohms	$\operatorname{tg} \alpha$
0°	1,42	1,3	0,003
10°	1,41	0,9	0,002
20°	1,41	0,5	0,001
30°	1,415	0,5	0,001
40°	1,42	0,7	0,0015

Capacité en courant continu		
Température degrés	Décharge en $\frac{1}{250^e}$ s.	Décharge en $\frac{1}{30^e}$ s.
— 3°	1,88	2,45
20°	1,51	1,53
50°	1,79	1,82

Ces nombres indiquent nettement l'existence d'un minimum pour la capacité et l'angle de perte aux environs de 20°.

I. *Gutta*. — Je possédais un câble à gutta de bonne qualité, mais il était à deux conducteurs isolés à la gutta et séparés par du jute imprégné ; ce dernier aurait causé des pertes supplémentaires, de sorte que je n'ai pu l'employer. L'échantillon essayé a été de la gutta du commerce relativement impure.

$\omega = 5\,500$ (Pont modifié $R = R' = 10\,000$ ohms)			
Température degrés	γ millimicrofarad	Capacité millimicrofarad	$\operatorname{tg} \alpha$
— 5°	1,27	2,85	0,07
6°	1,75	2,98	0,095
10°	1,85	3,02	0,101
20°	1,80	3,04	0,100
30°	1,20	3,04	0,065
41°	0,38	3,05	0,021
55°	0,25	3,06	0,014

$\omega = 1\,570\,000$ (Méthode de résonance)			
Température	Capacité	R	$\operatorname{tg} \alpha$
5°	2,82	4,7	0,021
20°	2,89	7,3	0,033
30°	2,94	8,2	0,038
50°	2,97	8,5	0,040

Les essais en continu m'ont montré l'existence de résidus notables à basse température ; il m'a été impossible de relever des nombres précis.

Les résultats précédents indiquent que l'angle de perte passe par un minimum ; quand la fréquence augmente, la valeur de ce minimum diminue et la température correspondante augmente.

J. Conclusion. — On ne peut indiquer de loi rigoureuse pour représenter les pertes en fonction de la température ; les exemples précédents peuvent pourtant donner lieu à quelques remarques générales.

Pour des corps solides sur lesquels la température n'a pas d'action mécanique sensible (verre), les pertes sont proportionnelles à une certaine puissance de la température absolue. Les pertes dues aux fuites sont négligeables vis-à-vis des pertes par viscosité.

L'apparition de l'état pâteux (cire; résine), provoque une augmentation notable des pertes par viscosité, mais n'a pas une grande influence sur les fuites.

Le passage de l'état pâteux à l'état liquide transforme la viscosité en conductibilité, sauf pour le papier imprégné ; dans ce dernier cas, en effet, les charges électriques peuvent se mouvoir dans la matière d'imprégnation fondue mais sont presque complètement arrêtées par les cloisons de papier et jouent le rôle de résidus.

Dans un liquide bien fluide, les pertes à basse fréquence ne sont dues qu'aux fuites ; à haute fréquence au contraire, les pertes par viscosité sont nettement prépondérantes.

III. INFLUENCE DE LA TENSION. — A. L'influence de la tension sur l'angle de perte est relativement faible. La plupart des auteurs indiquent que les pertes sont proportionnelles à une certaine puissance de la tension, voisine du carré. Pour M. Beaulard de Lenaizan (balistique), et M. Houllé (calorimètre), cet exposant est voisin de 2. Pour Skinner (wattmètre électrostatique), il varie de 2 à 2,5 suivant les échantillons. Enfin, Frigon (wattmètre électrodynamique) trouve qu'il varie depuis 2,7 à 15° jusqu'à 1,9 à 120°.

Toutes les méthodes ne sont pas également pratiques pour étudier l'influence de la tension.

Le tracé des cycles ne donne pas une précision suffisante. Chaque point n'est déterminé qu'approximativement ; il en résulte que l'erreur commise pour l'évaluation de l'angle de perte est souvent supérieure à la variation due à l'influence de la tension. En outre, j'ai constaté que si les décharges au balistique ne sont pas poussées assez loin, les résidus qui subsistent après les essais à haute tension rendent impossible tout essai ultérieur à basse tension.

La méthode calorimétrique, longue et peu sensible, est également à rejeter. Les mesures au wattmètre et l'utilisation de la résonance sont évidemment possibles, mais le procédé le plus indiqué est certainement l'emploi d'une méthode de zéro, le pont par exemple.

B. J'ai étudié au pont de Wien un condensateur à papier paraffiné possédant une grande capacité sous un petit volume (25 cm³). Je l'ai comparé à un étalon au mica ; les faibles pertes que pouvait présenter celui-ci n'ont aucune importance car il ne s'agit ici que de mesures relatives.

1° Sous 5 volts efficaces, j'ai obtenu, à la fréquence 900 :

$$C = 0,985 \mu F \qquad \qquad \qquad \text{tg } \alpha = 0,041$$

2° Sous 105 volts efficaces, l'équilibre n'était que momentané, la capacité et l'angle de perte augmentant sans cesse ; j'ai pu noter les valeurs suivantes :

Au bout de 1 minute	$C = 0,987 \mu F$	$\text{tg } \alpha = 0,048$
— — 2 —	$C = 0,990$	$\text{tg } \alpha = 0,057$
— — 3 —	$C = 0,995$	$\text{tg } \alpha = 0,071$

3° Au bout de 3 minutes, j'ai ramené la tension à 5 volts. L'équilibre s'est maintenu pour :

$$C = 0,995 \mu F \qquad \qquad \qquad \text{tg } \alpha = 0,069$$

J'ai donc été amené à conclure que la variation de l'angle de perte était due à l'échauffement du diélectrique ; il se dégageait dans le condensateur une quantité de chaleur voisine de 0,5 calorie par seconde et qui ne pouvait se dissiper que très lentement. En continuant l'essai sous 105 volts pendant 10 minutes, j'ai même obtenu la fusion de la paraffine.

C. J'ai voulu refaire une expérience analogue sur des condensateurs de faible capacité ; j'ai été conduit à opérer sous des tensions plus élevées et pour cela, il m'a fallu, tout en conservant le montage de Wien, apporter au pont certaines modifications de détail.

Pour éviter que le condensateur de comparaison ne soit le siège d'effluves, je l'ai rempli de pétrole bien sec distillé sur du sodium ; j'ai recommencé son étalonnage et constaté que ses pertes étaient à peu près insensibles.

Je n'ai pu me placer dans les conditions de sensibilité maximum, sans quoi mes résistances auraient été soumises à un régime excessif ; en leur donnant une valeur de 2 000 ohms, dans le cas de

condensateurs de $1 \text{ m } \mu\text{F}$, je ne leur faisais supporter que le $\frac{1}{10^6}$ de la tension totale, de sorte qu'elles pouvaient rester constamment en circuit sans chauffer d'une manière appreciable.

Enfin, pour éviter que le contact du téléphone ne devienne dangereux en cas de claquage d'un condensateur, je l'ai réuni au pont par l'intermédiaire d'un transformateur bien isolé à circuit magnétique fermé.

1° J'ai étudié un ballon de verre très mince, argenté à l'intérieur et à l'extérieur et dont le col était légèrement paraffiné. A la fréquence 900 p.s, sous 70 volts, j'ai obtenu :

$$C = 1,12 \text{ m } \mu\text{F} \quad \text{tg } \alpha = 0,0285$$

2° Sous 850 volts, l'équilibre était permanent

$$C = 1,13 \text{ m } \mu\text{F} \quad \text{tg } \alpha = 0,0325$$

3° En recommençant à 70 volts, j'ai retrouvé encore :

$$C = 1,12 \text{ m } \mu\text{F} \quad \text{tg } \alpha = 0,0285$$

Ces résultats semblent indiquer que par suite de la faible capacité calorifique du condensateur et de sa grande surface de rayonnement, le régime s'établit rapidement et qu'au bout de très peu de temps, l'échauffement reste constant.

4° Pour confirmer ces résultats, j'ai augmenté la capacité calorifique du condensateur en le remplissant de pétrole et en le plongeant dans un verre plein de pétrole. J'ai alors obtenu :

Sous une tension efficace de 70 volts $C = 1,13 \text{ m } \mu\text{F} \quad \text{tg } \alpha = 0,0280$

— — — 850 — $C = 1,13 \text{ — } \text{tg } \alpha = 0,0285$

Ainsi, lorsqu'on empêche l'élévation de température, l'angle de perte reste indépendant de la tension.

D. J'ai essayé de mesurer l'échauffement du condensateur pour préciser les résultats précédents.

J'ai utilisé pour cela un ballon analogue au précédent, mais auquel j'avais adapté un tube capillaire horizontal contenant un index de pétrole ; ce condensateur était placé dans une étuve non allumée au début de l'expérience.

1° Sous une tension efficace de 104 volts, l'index est resté immobile et j'ai obtenu :

$$C = 1,28 \text{ m } \mu\text{F} \quad \text{tg } \alpha = 0,026$$

2° Sous une tension efficace de 950 volts, l'index s'est déplacé lentement puis s'est fixé au bout d'une minute environ après avoir

parcouru 2,8 cm (ce qui, d'après le volume du ballon et le diamètre du tube correspondait à 1°4). J'ai noté alors :

$$C = 1,30 \text{ m } \mu\text{F} \quad \text{tg } \alpha = 0,031$$

3° J'ai ensuite allumé l'étuve quelques instants puis l'ai éteinte ; l'index s'est déplacé lentement et s'est fixé à 3,6 cm de sa position initiale. J'ai aussitôt recommencé un essai sous 104 volts et obtenu :

$$C = 1,31 \text{ m } \mu\text{F} \quad \text{tg } \alpha = 0,032$$

Les rapports $\frac{0,031 - 0,026}{2,8}$ et $\frac{0,032 - 0,026}{3,6}$ étant égaux à l'approximation des mesures, j'ai considéré comme établi quantitativement que la variation de l'angle de perte était dans le cas étudié uniquement dû à un échauffement.

E. Dans les exemples précédents à tension élevée, j'avais pris soin d'argenter les tubes pour que le contact entre le diélectrique et les armatures soit excellent et de paraffiner le col du tube pour éviter les effluves.

Lorsque les armatures ne sont séparées que par un léger intervalle d'air, les pertes par effluves peuvent devenir importantes. On peut les mettre en évidence sur un condensateur plan dont les lames isolantes ne débordent pas sur les armatures, mais il est particulièrement facile de constater leur existence sur des condensateurs à air.

J'ai donc comparé un condensateur variable à air avec un autre du même type rempli de pétrole bien sec. Aux basses tensions, ce dernier était le plus mauvais, mais pour lui $\text{tg } \alpha$ ne dépassait pas 0,002. Aux environs de 300 volts efficaces, les pertes ont apparu dans le condensateur à air et sont devenues rapidement prépondérantes ; $\text{tg } \alpha$ a atteint 0,02 pour 500 volts et 0,07 pour 600 volts. Enfin, un peu avant 700 volts, des étincelles ont jailli entre les armatures.

Je dois ajouter que les dernières mesures n'étaient pas susceptibles d'une grande précision ; les résultats variaient constamment sans cause apparente.

F. *Conclusion.* — Lorsque la température reste constante, la perte dans le diélectrique est proportionnelle au carré de la tension. Le plus souvent, par suite de l'échauffement du diélectrique ou de l'existence d'effluves, les pertes croissent plus vite que le carré de la tension.

IV. — INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR. — A. *Généralités.* —

L'angle de perte devrait être indépendant de l'épaisseur du diélectrique ; un certain nombre d'effets secondaires empêche le plus souvent de vérifier cette loi avec précision.

Les pertes dans un condensateur sont de deux sortes. Les unes, dues à la viscosité et à la conductibilité, se produisent dans la masse même et peuvent avoir pour effet d'échauffer sensiblement l'intérieur du diélectrique si la dissipation de chaleur par les armatures n'est pas suffisante. Les autres ont lieu à la surface, par suite du mauvais contact avec les armatures et sont proportionnelles à leur étendue.

Si l'on double l'épaisseur du diélectrique, en laissant par exemple le champ constant, ces différentes pertes ne sont pas modifiées de la même manière. En effet, puisque la surface de contact n'a pas changé, les pertes à la surface sont sensiblement les mêmes ; les pertes totales, par contre, ont doublé ; l'influence relative des pertes à la surface a donc diminué de moitié. D'autre part, la quantité de chaleur dégagée par centimètre cube n'a pas varié, mais, puisque le volume du diélectrique a doublé tandis que la surface d'évacuation est restée constante, l'élévation de température est supérieure ; l'influence de l'échauffement est donc exagérée.

Si c'est la tension entre les armatures et non le champ que l'on maintient constante, les conclusions sont inverses. Dans tous les cas, suivant la qualité du contact et la valeur du coefficient de température, on peut trouver expérimentalement que l'angle de perte est une fonction croissante ou décroissante de l'épaisseur.

J'ai opéré de plusieurs manières pour modifier l'épaisseur du diélectrique.

B. *Diélectriques solides. Plaques superposées.* — Il est difficile d'obtenir deux plaques identiques ; même si elles sont découpées dans le même échantillon, leur angle de perte n'est pas rigoureusement égal ; en outre, le contact des deux surfaces du diélectrique accolées peut être mauvais.

Si c_1 et c_2 sont les capacités de condensateurs formés avec chacune des plaques, α_1 et α_2 les angles de perte correspondants, la capacité C d'un condensateur formé avec les deux plaques superposées et son angle de perte A doivent satisfaire aux relations :

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad \frac{\operatorname{tg} A}{C} = \frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{C_1} + \frac{\operatorname{tg} \alpha_2}{C_2}.$$

J'ai essayé d'abord des lames de mica armées d'étain ; avec des lames très minces, la loi est très mal vérifiée, probablement parce qu'il restait entre elles une épaisseur d'air relativement importante. Avec des micas plus épais, j'ai obtenu des résultats meilleurs mais peu précis cependant à cause de la faiblesse de l'angle de perte.

J'ai étudié ensuite des lames de verre ordinaire (plaques photographiques) armées d'étain. Les mesures ont été faites au pont modifié, à la fréquence 900 p/s en compensant les pertes du condensateur étudié par un condensateur variable γ ; les bras du pont avaient une résistance de 10 000 ohms ; la tension d'alimentation était de 50 volts efficaces, ce qui correspond à 25 volts environ aux bornes du condensateur étudié.

1 ^o plaque	$\gamma = 0,57 \text{ m } \mu \text{ F}$	$C_1 = 0,48 \text{ m } \mu \text{ F}$	$\operatorname{tg} \alpha_1 = 0,0322$
2 ^o plaque	$\gamma = 0,54$	$C_2 = 0,42$	$\operatorname{tg} \alpha_2 = 0,0305$
les deux superposés	$\gamma = 0,52$	$C = 0,205$	$\operatorname{tg} A = 0,0294$

Les formules théoriques donnent dans ce cas :

$$C = 0,225 \text{ m } \mu \text{ F} \quad \text{et} \quad \operatorname{tg} A = 0,0312.$$

Ces différences proviennent d'un intervalle d'air important entre les lames de verre.

J'ai recommencé l'expérience avec deux lames bien planes, vérifiées optiquement, et bien nettoyées ; les résultats ont été bien meilleurs :

1 ^o plaque	$\gamma = 0,35 \text{ m } \mu \text{ F}$	$C_1 = 0,032 \text{ m } \mu \text{ F}$	$\operatorname{tg} \alpha_1 = 0,198$
2 ^o plaque	$\gamma = 0,39$	$C_2 = 0,034$	$\operatorname{tg} \alpha_2 = 0,220$
les deux superposées	$\gamma = 0,36$	$C = 0,017$	$\operatorname{tg} A = 0,204$

Les nombres théoriques sont $C = 0,165 \text{ m } \mu \text{ F}$ et $\operatorname{tg} A = 0,0209$.

Avec du papier paraffiné de 0,5 mm d'épaisseur armé d'étain, j'ai vérifié convenablement la loi théorique, mais avec du papier très mince, de 0,02 mm environ, j'ai nettement mis en évidence l'action de la température.

1^{er} essai : tension efficace d'alimentation 5 volts.

1 ^o feuille	$\gamma = 0,68 \text{ m } \mu \text{ F}$	$C_1 = 3,97 \text{ m } \mu \text{ F}$	$\operatorname{tg} \alpha_1 = 0,0334$
2 ^o feuille	$\gamma = 0,65$	$C_2 = 4,07$	$\operatorname{tg} \alpha_2 = 0,0420$
les deux superposées	$\gamma = 0,675$	$C = 1,98$	$\operatorname{tg} A = 0,0380$

Les résultats devraient être théoriquement :

$$C = 2,02 \text{ m } \mu \text{ F} \quad \text{et} \quad \operatorname{tg} A = 0,0375$$

2^e essai : tension efficace d'alimentation 75 volts.

1 ^e feuille	$\gamma = 0,77 \text{ m } \mu \text{ F}$	$C_1 = 4,07 \text{ m } \mu \text{ F}$	$\text{tg } \alpha_1 = 0,0435$
2 ^e feuille	$\gamma = 0,745$	$C_2 = 4,15$	$\text{tg } \alpha_2 = 0,0420$
les deux superposées	$\gamma = 0,70$	$C = 2,01$	$\text{tg } A = 0,0335$

Les formules théoriques donnent : $C = 2,10 \text{ m } \mu \text{ F}$ et $\text{tg } A = 0,0427$

Alors que dans le premier essai l'équilibre se maintenait indéfiniment, il était difficile à obtenir dans le deuxième ; les nombres précédents ont été notés une demi-minute après la mise sous tension.

C. *Diélectriques liquides ou pâteux.* — Un diélectrique liquide ou pâteux est très suffisamment homogène ; il est facile de faire varier son épaisseur ; enfin, son contact avec les armatures est excellent. Pour toutes ces raisons, la loi théorique se vérifie convenablement.

J'ai opéré, sous 5 volts seulement, avec de l'huile lourde, puis avec de la vaseline ; ces derniers résultats sont les plus précis parce que l'angle de perte est le plus important.

Pour $C = 0,31 \text{ m } \mu \text{ F}$, $\text{tg } \alpha = 0,0181$

Pour $C = 0,65 \text{ m } \mu \text{ F}$, $\text{tg } \alpha = 0,0185$

D. *Solides d'épaisseur variable.* — J'ai fait varier l'épaisseur de plaques par fusion, de ballons de verre par soufflage au chalumeau et de lames de caoutchouc par traction ; les nombres obtenus sont tout à fait en contradiction avec la loi à vérifier. On ne doit pas s'étonner des résultats relatifs à la cire et au verre parce que les effets de l'échauffement ne disparaissent que lentement, mais on doit noter que la tension mécanique a sur la viscosité du caoutchouc une influence considérable.

Le condensateur utilisé pour ces dernières expériences était constitué par un ballon de caoutchouc très élastique contenant du mercure et plongeant dans un cristalliseur plein de mercure. En faisant varier la quantité contenue dans le ballon, je pouvais agir sur son volume et par suite sur l'épaisseur de la paroi.

Pour une tension mécanique nulle (mercure au même niveau à l'intérieur et à l'extérieur), j'ai obtenu $\text{tg } \alpha = 0,0315$.

Pour une épaisseur 11 fois plus faible (calculée d'après le volume de l'armature intérieure), j'ai obtenu $\text{tg } \alpha = 0,0065$.

Ainsi, quand l'épaisseur est devenue 11 fois plus faible, l'angle de perte est tombé au cinquième de sa valeur. Le contact mercure-caoutchouc est d'ailleurs excellent et ne peut être le siège de pertes parasites. Enfin, j'ai vérifié, en faisant varier la ten-

sion d'alimentation, que cette diminution de l'angle de perte n'était pas due à un échauffement, ce qui est naturel puisque la lame était extrêmement mince et plongeait dans du mercure.

Dans ces essais, le diélectrique était soumis à un champ extrêmement intense. L'épaisseur du caoutchouc non tendu était de 0,02 mm. Pour une épaisseur 11 fois plus faible et une tension de 100 volts, le champ dépassait plusieurs centaines de volts par centimètre.

E. *Conclusion.* — Lorsque le diélectrique reste physiquement identique à lui-même et qu'il est en contact parfait avec les armatures, l'angle de perte est indépendant de l'épaisseur.

V. INFLUENCE DE L'HUMIDITÉ. — Sauf de rares exceptions, les isolants sont hygrométriques. L'eau absorbée peut être dosée chimiquement dans des corps qui en dissolvent une quantité notable comme la cire ou l'huile ; elle est mise en évidence dans les autres cas par les variations que subissent les propriétés diélectriques sous l'influence d'un séchage prolongé.

J'ai étudié l'influence de l'humidité, au pont modifié pour les fréquences musicales, par la méthode de résonance à haute fréquence et par la décharge au balistique en continu. Voici quelques résultats :

A. *Papier buvard.* — Un des échantillons, exposé pendant plusieurs jours dans le laboratoire, possédait une certaine humidité ; l'autre avait été séché quelques minutes à l'étuve.

1° *Papier buvard humide.*

A la fréquence 900 p:s $\left\{ \begin{array}{ll} R = R' = 10\,000 \text{ ohms} & \text{Capacité : } 1,48 \text{ m } \mu\text{F} \\ \gamma = 1,12 \text{ m } \mu\text{F} & \text{tg } \alpha = 0,063. \end{array} \right.$

Résistance en courant continu : 16 mégohms.

2° *Papier buvard sec.*

A la fréquence 900 p:s $\left\{ \begin{array}{ll} R = R' = 2\,000 \text{ ohms} & \text{Capacité : } 1,22 \text{ m } \mu\text{F} \\ \gamma = 0,24 \text{ m } \mu\text{F} & \text{tg } \alpha = 0,0027 \end{array} \right.$

Résistance en courant continu : 280 mégohms.

Cet essai ne permet pas d'évaluer avec précision l'influence de l'humidité sur la constante diélectrique parce que la disposition de la feuille de papier entre les armatures n'était pas identique dans les deux cas, mais, il montre nettement que :

En courant continu comme en courant alternatif, les pertes sont environ 20 fois plus grandes pour le papier humide que pour le papier sec. Les pertes en courant alternatif ne proviennent pas simplement des fuites mesurées en continu ; la présence de

celles-ci ne fournirait en effet pour l'angle de perte, à 900 p:s que les valeurs :

$$\text{Papier humide } \operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{1,48 \cdot 10^{-9} \cdot 16 \cdot 10^6 \cdot 2 \pi \cdot 900} = 0,0075.$$

$$\text{Papier sec } \operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{1,22 \cdot 10^{-9} \cdot 280 \cdot 10^6 \cdot 2 \pi \cdot 900} = 0,00052.$$

B. *Papier paraffiné*. — Le premier échantillon a été constitué par du buvard possédant l'humidité du laboratoire, imprégné dans de la paraffine fondue à 55°. Pour la fabrication du second, le papier avait été séché au préalable et la paraffine a été portée à 130°; un dégagement abondant de bulles s'est produit pendant le paraffinage.

1° *Papier paraffiné humide*.

$$\text{Fréquence 900 p:s } \left\{ \begin{array}{ll} R = R' = 10\,000 \text{ ohms} & \text{Capacité : } 0,52 \text{ m } \mu\text{F} \\ \gamma = 0,66 \text{ m } \mu\text{F} & \operatorname{tg} \alpha = 0,038 \end{array} \right.$$

$$\text{Fréquence 250 000 p:s, } R = 9,2: \text{ Capacité } 0,45 \text{ m } \mu\text{F } \operatorname{tg} \alpha = 0,0064$$

$$\text{Courant continu } \left\{ \begin{array}{l} \text{Résistance de fuites : } 1\,040 \text{ mégohms.} \\ \text{Capacité pour une décharge de } \frac{1}{40^e} \text{ de sec., } 0,8 \text{ m } \mu\text{F.} \\ \text{Capacité pour une décharge de } 10 \text{ sec., } 3,17 \text{ m } \mu\text{F.} \end{array} \right.$$

2° *Papier paraffiné sec* :

$$\text{Fréquence 900 p:s } \left\{ \begin{array}{ll} R = R' = 2\,000 \text{ ohms} & \text{Capacité : } 0,51 \text{ m } \mu\text{F} \\ \gamma = 0,31 \text{ m } \mu\text{F} & \operatorname{tg} \alpha = 0,0035 \end{array} \right.$$

$$\text{Fréquence 250 000 p:s, } R = 3,45. \text{ Capacité : } 0,48 \text{ m } \mu\text{F } \operatorname{tg} \alpha = 0,0026$$

$$\text{Courant continu } \left\{ \begin{array}{l} \text{Résistance de fuites : } 17\,000 \text{ mégohms.} \\ \text{Capacité pour une décharge de } \frac{1}{40^e} \text{ de sec. } 0,58 \text{ m } \mu\text{F.} \\ \text{Capacité pour une décharge de } 10 \text{ sec. } 1,36 \text{ m } \mu\text{F.} \end{array} \right.$$

Le papier paraffiné sec est donc bien meilleur, surtout aux basses fréquences. La comparaison de ces résultats aux précédents montre immédiatement que le paraffinage du buvard a considérablement réduit les fuites; par contre, les pertes en alternatif n'ont pas été beaucoup modifiées.

C. *Porcelaine poreuse*. — J'ai étudié un vase de pile neuf, paraissant relativement sec extérieurement et ayant séjourné longtemps dans le laboratoire.

$$\text{Fréquence 900 p:s } \left\{ \begin{array}{ll} R = R' = 10\,000 \text{ ohms} & \text{Capacité : } 0,33 \text{ m } \mu\text{F} \\ \gamma = 0,45 \text{ m } \mu\text{F environ} & \operatorname{tg} \alpha = 2,6 \text{ env.} \end{array} \right.$$

Fréquence 250 000 p/s : $R = 120$ ohms. Capacité : $0,11 \text{ m } \mu \text{ F}$
 $\text{tg } \alpha = 0,055$.

Courant continu	{	Capacité pour une déch. de $\frac{1}{150^e}$ de sec.,	$1,35 \text{ m } \mu \text{ F}$
		— — — 2 sec.,	$5 \text{ m } \mu \text{ F}$.
		— — — 30 sec.,	$32 \text{ m } \mu \text{ F}$.

Les dimensions de ce vase poreux étaient telles que cette capacité de $32 \text{ m } \mu \text{ F}$ correspondait à un pouvoir inducteur de 3 800, chiffre extraordinairement grand.

Après séchage pendant un quart d'heure à l'étuve, j'ai obtenu à 900 p/s le résultat suivant :

$$\begin{array}{ll} R = R' = 10\,000 \text{ ohms} & \text{Capacité : } 0,06 \text{ m } \mu \text{ F} \\ \gamma = 1,07 \text{ m } \mu \text{ F} & \text{tg } \alpha = 0,06 \end{array}$$

Cette fois, les pertes sont considérablement réduites et le pouvoir inducteur tombe à 7, chiffre tout à fait acceptable.

D. *Conclusion.* — Pour les matières poreuses, l'humidité semble être la seule cause de pertes, tant en courant continu qu'en courant alternatif.

L'influence de l'humidité se fait surtout sentir à basse fréquence.

Les pertes en courant alternatif ne peuvent pas se déduire de la résistance de fuites mesurée en courant continu.

VI. INFLUENCE DE LA NATURE DES ARMATURES. — Le contact entre le diélectrique et les armatures a une influence marquée sur les qualités d'un condensateur, mais il ne semble pas que la question ait préoccupé beaucoup de chercheurs.

En courant continu, M. Bouty ⁽¹⁾ signale que dans les condensateurs au mica armés d'étain, le pouvoir inducteur apparent est bien inférieur à celui du mica argenté ; Allen ⁽²⁾ indique que l'éri-noïd poli présente moins de résidus que lorsqu'il est dépoli. En courant alternatif, Bureau ⁽³⁾ montre que le contact papier d'étain-toile huilée n'est pas nettement défini.

Pourtant, l'étude de ce contact mériterait d'être étudiée d'une manière spéciale, car il peut entraîner pour les propriétés du

⁽¹⁾ BOUTY. *Annales de Chimie et de Physique*, 6^e Série, tome XXIV, page 391, 1891.

⁽²⁾ ALLEN. *Scientifics Proceedings Royal Dublin Society*, 1913, vol. XV N^o 29, p. 331.

⁽³⁾ BUREAU. *Bulletin de la Société Internationale des Electriciens*, 1913, 3^e Série, tome III, p. 669.

diélectrique des erreurs notables comme le prouvent les exemples suivants :

A. *Diélectrique : verre, armatures : Mercure.* — Le condensateur est constitué par un tube à essai rempli de mercure et plongé dans un autre tube plein de mercure. L'armature externe a une hauteur fixe de 10 cm; on fait varier la hauteur de l'armature interne.

Les mesures sont faites par la méthode du pont modifié pour les fréquences téléphoniques (R et R' sont les bras du pont, γ la capacité de compensation) et par la méthode de résonance en haute fréquence (R est la résistance en série avec le condensateur à air).

1 ^o Fréquence 900 p:s (R R' 10 000 ohms)			
Différence entre le niveau de l'armature interne et celui de l'armature externe	γ	Capacité	tg α
millimètres	millimicrofarad	millimicrofarad	
10	0,87	0,955	0,048
2	0,67	0,958	0,037
0	0,60	0,963	0,033
— 2	0,64	0,967	0,035
— 10	0,84	0,970	0,046
2 ^o Fréquence 250 000 p:s			
	R		
	ohms		
10	4,15	0,86	0,0047
2	3,70	0,92	0,0045
0	3,60	0,94	0,0045
— 2	3,65	0,95	0,0046
— 10	3,80	0,955	0,0048

Ainsi, quand le niveau du mercure n'est pas le même à l'intérieur et à l'extérieur, les pertes sont augmentées ; il est naturel de penser que les charges électriques des armatures se répandent peu à peu à la surface conductrice du verre, jouant ainsi le rôle de résidus. On s'explique alors pourquoi les pertes passent par un minimum lorsque les deux niveaux sont égaux, et pourquoi l'effet perturbateur est d'autant plus sensible que la fréquence est plus basse. J'ai vérifié d'ailleurs qu'un léger paraffinage du col du tube affaiblissait considérablement le phénomène.

B. *Diélectrique : verre, armatures : Etain.* — J'ai comparé le mercure et le papier d'étain ; le diélectrique était un tube à essai moins mauvais que le précédent. L'armature interne était

toujours du mercure ; la surface extérieure du verre était tantôt recouverte de papier d'étain, tantôt plongée dans un autre tubé plus grand rempli de mercure ; les deux armatures avaient toujours la même hauteur.

Les expériences étaient alternées et je prenais mes précautions pour que la température du verre fût toujours constante ; en particulier, après avoir enroulé le papier d'étain, je remplissais chaque fois le condensateur de mercure froid pour enlever au diélectrique la chaleur que ma main avait pu lui communiquer ; un interrupteur me permettait de ne mettre le condensateur sous tension que pendant un temps très court.

Les méthodes employées étaient les mêmes que précédemment. Voici les résultats obtenus dans plusieurs essais successifs :

1° Fréquence 900 p/s (R = R' = 10 000 ohms)			
	γ millimicrofarad	Capacité millimicrofarad	tg α
Etain	0,68	0,345	0,0385
Mercure	0,36	0,482	0,0198
Etain	0,44	0,380	0,0240
Mercure	0,36	0,486	0,0198
Etain	0,59	0,350	0,0325
Mercure	0,37	0,478	0,0202
Etain	0,49	0,395	0,0270
Mercure	0,36	0,483	0,0198

2° Fréquence 254 000 p/s			
	R ohms	Capacité millimicrofarad	tg α
Etain	13,5	0,310	0,0055
Mercure	14,7	0,455	0,0088
Etain	12,3	0,325	0,0053
Mercure	14,5	0,459	0,0088
Etain	13	0,325	0,0056
Mercure	15	0,450	0,0089
Etain	12,4	0,320	0,0052
Mercure	14,5	0,455	0,0087

En courant continu, les condensateurs à armatures d'étain présentent des résidus considérables, mais aucune mesure précise n'a été possible.

On voit sur ces résultats que les capacités obtenues avec des armatures en mercure diffèrent légèrement pour une même fréquence ; la constance de l'angle de perte correspondant montre que c'est simplement parce que les dimensions du condensateur n'étaient pas chaque fois rigoureusement les mêmes.

Au contraire, pour les armatures en papier d'étain, les capa-

cités et les angles de perte varient sans aucune loi ; le contact est tout à fait mal défini ; les essais suivants conduisent d'ailleurs aux mêmes conclusions.

C. *Diélectrique : Toile huilée, armatures : Etain.* — La toile huilée a d'abord été placée entre deux plaques d'aluminium bien planes (mais pas absolument parfaites) chargées par des poids, et étudiée à la fréquence 900 p:s ; la surface utile était de 94 cm². Les résistances R et R' étaient de 10 000 ohms.

Poids grammes	γ millimicrofarad	Capacité millimicrofarad	$\lg \alpha$
50	0,31	0,435	0,0170
200	0,32	0,480	0,0176
500	0,41	0,590	0,0223

Le même échantillon de toile a été équipé avec deux armatures de papier d'étain légèrement pressées.

$$\gamma = 0,57 \text{ m}\mu\text{F} \quad \text{Capacité : } 0,68 \text{ m}\mu\text{F} \quad \text{tg } \alpha = 0,0315$$

Après avoir soigneusement écrasé le papier d'étain avec le doigt pour lui faire épouser toutes les rugosités de la surface :

$$\gamma = 0,88 \text{ m}\mu\text{F} \quad \text{Capacité : } 0,82 \text{ m}\mu\text{F} \quad \text{tg } \alpha = 0,0485$$

L'échantillon a été garni d'un petit rebord en paraffine, rempli d'une légère couche de mercure et mis à nager sur du mercure.

$$\gamma = 0,90 \text{ m}\mu\text{F} \quad \text{Capacité : } 0,94 \text{ m}\mu\text{F} \quad \text{tg } \alpha = 0,0495$$

Il a été ensuite protégé par un paraffinage sur les bords, plombaginé sur toute la surface utile, puis équipé avec des armatures d'étain.

$$\gamma = 0,89 \text{ m}\mu\text{F} \quad \text{Capacité : } 0,92 \text{ m}\mu\text{F} \quad \text{tg } \alpha = 0,0490$$

Ces résultats indiquent clairement que, dans le cas actuel, plus le contact est intime, plus l'angle de perte est grand.

D. *Diélectrique : Papier buvard. Armatures : Papier d'étain.* — Avec l'humidité du laboratoire, plié en forme de boîte, rempli d'un peu de mercure et nageant sur du mercure (à la fréquence 900 p:s au pont, pour $R = R' = 10\,000$ ohms), il a donné :

$$\gamma = 4,85 \text{ m}\mu\text{F} \quad \text{Capacité : } 0,410 \text{ m}\mu\text{F} \quad \text{tg } \alpha = 0,265$$

La même surface utile (55 cm²) armée d'étain et chargée de 50 g :

$$\gamma = 1,02 \text{ m}\mu\text{F} \quad \text{Capacité : } 0,051 \text{ m}\mu\text{F} \quad \text{tg } \alpha = 0,056$$

Pour une charge de 1 kg :

$$\gamma = 2,90 \text{ m } \mu \text{ F} \quad \text{Capacité : } 0,315 \text{ m } \mu \text{ F} \quad \text{tg } \alpha = 0,160$$

E. *Diélectrique : Verre. Armatures : Eau.* — En courant continu et à basse fréquence, je n'ai obtenu que des résultats incohérents, l'humidité se condensant sur les parties du diélectrique voisines des armatures. Pour les fréquences téléphoniques, les pertes sont plus grandes avec l'eau qu'avec le mercure ; en haute fréquence, elles sont équivalentes.

1° Fréquence 900 p:s (R = R' = 10 000 ohms)			
	γ millimicrofarads	Capacité millimicrofarads	lg α
Mercure	0,51	0,936	0,0280
Eau ordinaire	0,79	0,955	0,0435
Eau acidulée	0,90	0,963	0,0450

2° Fréquence 250 000 p:s			
	R ohms	C millimicrofarad	lg z
Mercure	7,5	0,903	0,0089
Eau ordinaire	7,6	0,925	0,0097
Eau acidulée	7,6	0,935	0,0098

F. *Diélectrique : Verre. Armatures : Limaille de fer.* — 1° A 900 p:s :

R = R' = 10 000 ohms $\gamma = 2,7 \text{ m } \mu \text{ F}$. Capacité : 0,35 m $\mu \text{ F}$ tg $\alpha = 0,15$.

2° A 250 000 p:s :

Capacité 0,10 m $\mu \text{ F}$ environ. Angle de perte très grand ; impossible d'obtenir la résonance.

3° Le même diélectrique, avec armatures de mercure ; à 900 périodes :

R = R' = 10 000 $\gamma = 0,45 \text{ m } \mu \text{ F}$. Capacité : 0,48 m $\mu \text{ F}$ tg $\alpha = 0,0247$

G. *Diélectrique : Verre. Armatures : Argent.* — Le verre était argenté par voie chimique ; j'ai obtenu les mêmes résultats qu'avec le mercure.

H. *Conclusion.* — Tous les résultats précédents s'expliquent simplement si l'on remarque que :

1° La surface des diélectriques est relativement conductrice (humidité, traces de doigts, produits d'oxydation) ;

2° Un mauvais contact entre l'isolant et l'armature nécessite un intervalle d'air plus ou moins important ;

3° Une armature pulvérulente a une résistance ohmique importante.

L'effet de contact peut donc être représenté schématiquement par la figure 41 où la signification des lettres est la suivante :

- A Partie du condensateur étudié en contact direct avec les armatures,
- B Partie du condensateur étudié ne touchant pas directement les armatures,
- C Condensateur à air en série avec le condensateur étudié aux endroits où le contact est mauvais,
- D Fuites superficielles du diélectrique,
- E Conductance ohmique des armatures.

Suivant que telle ou telle de ces quantités prédominera, les phénomènes pourront varier avec la fréquence suivant des lois bien différentes.

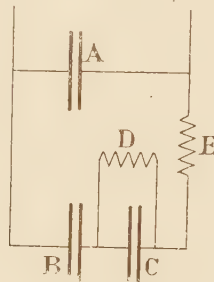


Fig. 41.

Avec le mercure et l'argent déposé chimiquement, lorsque les armatures ont même hauteur, les essais sont corrects.

Avec l'eau, la surface du diélectrique devient conductrice ; il en résulte une augmentation de la capacité et de l'angle de perte d'autant plus importante que la fréquence est moins élevée.

Avec le papier d'étain, les points de contact entre le diélectrique et l'armature sont rares, la capacité est donc toujours plus petite qu'avec le mercure. A haute fréquence, l'angle de perte est plus petit qu'avec le mercure à cause de la présence d'air, mais, aux fréquences téléphoniques, par suite de la conductance superficielle, il devient plus grand qu'avec le mercure.

Enfin, avec la limaille de fer, la conductance des armatures est faible ; ça n'a aucune importance en courant continu, mais rend les pertes d'autant plus grandes et la capacité d'autant plus petite que la fréquence est elle-même plus élevée.

VII. INFLUENCE DE LA FORME DE LA TENSION. — Dans les chapitres précédents, les condensateurs étaient soumis à une tension sinusoïdale; il est intéressant d'examiner le cas de tensions périodiques quelconques.

Toutes les méthodes ne conviennent évidemment pas pour cette étude; celle du pont, en particulier, est inapplicable. J'ai utilisé le balistique pour des fréquences très basses et des ondes voisines de la sinusoïdale, le calorimètre dans le cas de fréquences élevées et de tensions riches en harmoniques.

A. — Dans les essais au balistique, pour obtenir une courbe

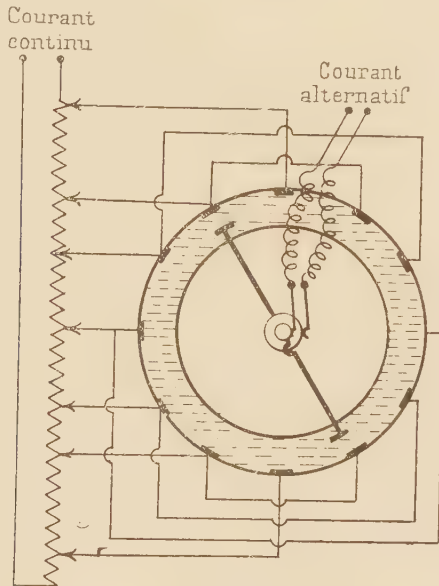


Fig. 42.

de tension variable à volonté, j'ai remplacé (fig. 42) la cuvette rectangulaire par un canal circulaire compris entre les parois de deux cristallisoirs concentriques. 12 électrodes équidistantes étaient réunies deux par deux à différents points d'un rhéostat métallique alimenté sous 110 volts. J'obtenais ainsi une courbe de tension aplatie ou pointue selon que les prises de courant sur le rhéostat étaient voisines des extrémités ou du milieu; en ne conservant que les deux électrodes extrêmes, je réalisais une répartition linéaire du potentiel.

J'ai opéré sur un condensateur au papier paraffiné, à une fréquence de 1,3 p.s. Pour faciliter la comparaison, les résultats

contenus dans le tableau suivant ont été tous ramenés par le calcul à une même tension maximum, ce qu'il aurait été délicat de réaliser expérimentalement.

ONDE SINUSOÏDALE			ONDE LINÉAIRE		
Degrés	Volts	Microcoulombs	Degrés	Volts	Microcoulombs
0	0	— 30	0	0	— 31
30	31	— 14	15	11,5	— 23
60	51	10	30	22	— 12
90	60	32	45	35	3
120	53	45	60	50	21
150	32	43	75	58	30
180	1	31	90	59	40
			120	40	41
			150	20	37
			180	— 1	28

ONDE POINTUE			ONDE APLATIE		
Degrés	Volts	Microcoulombs	Degrés	Volts	Microcoulombs
0	1	— 18	0	1,5	— 37
30	5	— 15	15	42	— 18
60	22	— 4	30	51	— 7,5
75	40	8	60	59	12
82	56	14	90	60	30
90	60	24	120	57	48
98	57	30	150	48	51
105	42	29	165	24	45
120	23	24	180	0	35
150	4	17			
180	0	16			

Les figures 43 et 44 représentent les différentes formes d'onde, ainsi que les cycles de viscosité correspondants ; j'ai construit également les courbes représentant le carré des tensions instantanées ; par intégration graphique, j'ai déterminé les tensions efficaces et les pertes :

	Onde sinusoïdale	Onde linéaire	Onde pointue	Onde aplatie
Tension efficace en volts	42,2	33,5	25,5	47,5
Pertes en ergs: seconde	62 000	41 500	25 300	83 000

Le quotient des pertes par le carré des tensions efficaces prend les valeurs suivantes :

Onde sinusoïdale	Onde linéaire	Onde pointue	Onde aplatie
34,5	36,5	38,5	37

Ce rapport est à peu près indépendant de la forme de l'onde. Dans cet exemple, les pertes ne dépendent donc que de la tension efficace.

B. — On doit s'attendre à ce que les conclusions précédentes ne soient plus valables lorsque l'importance des harmoniques est considérable. Pour mettre ce fait en évidence, j'ai utilisé une

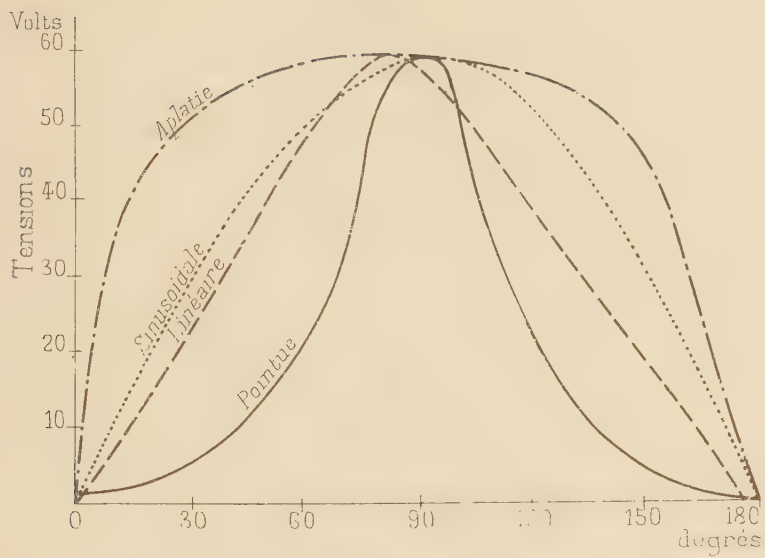


Fig. 43.

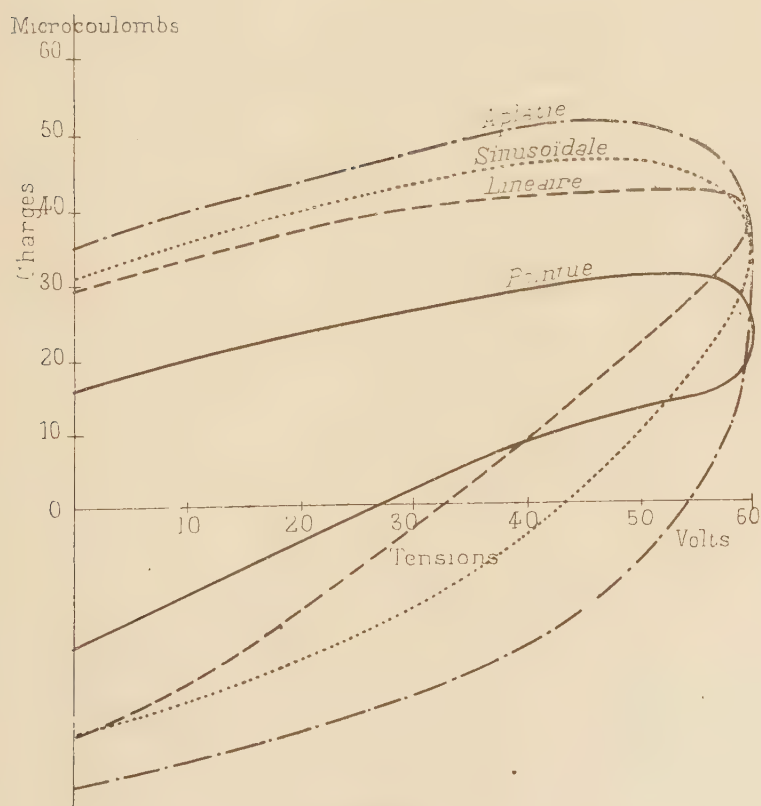


Fig. 44.

tension aussi rectangulaire que possible; il m'a fallu dans ces mesures, renoncer à tracer le cycle de viscosité et employer la méthode calorimétrique. Voici le dispositif adopté :

La tension appliquée au condensateur est tantôt sinusoïdale, tantôt rectangulaire. La première est fournie par un petit alternateur homopolaire dont le fer tournant porte 12 dents, et dont l'onde fondamentale est mise en résonance.

La tension rectangulaire est obtenue de la manière suivante :

L'arbre de l'alternateur porte un balai qui frotte sur 24 secteurs; ceux-ci, alternativement positifs et négatifs, sont connectés, à travers une lampe de sécurité, aux fils extrêmes d'une canalisation à 2×110 volts. Le condensateur, relié au balai et au fil neutre de la distribution est ainsi soumis à une tension rectangulaire dont l'ordonnée maximum est 110 volts.

Dans les deux cas, la période est la même; la tension efficace est indiquée par un voltmètre thermique branché en permanence aux bornes du condensateur.

J'ai étudié ainsi un condensateur à diélectrique presspahn; ses pertes, que j'avais eu l'occasion de mesurer précédemment en courant sinusoïdal étaient sensiblement proportionnelles à la fréquence; il me semblait par suite tout indiqué pour exagérer l'influence des harmoniques.

Voici les résultats obtenus dans un essai à la fréquence 335 p:s :

1° Onde sinusoïdale :

Tension efficace : 103 volts.

Echauffement au bout de 10 m : $0^{\circ}13$.

2° Onde rectangulaire :

Tension maxima : + 109 et — 106 volts.

Tension efficace : 92 volts.

Echauffement au bout de 5 m : $0^{\circ}24$.

Ainsi, la puissance perdue dans le cas de l'onde rectangulaire est, dans cet exemple, $\frac{0,24}{0,13} \times \frac{103^2}{92^2} \times \frac{10}{5} = 4,6$ fois plus grande que pour l'onde sinusoïdale de même tension efficace.

C. — *Conclusion.* — Pour des ondes s'écartant peu de la sinusoïdale, les pertes ne dépendent que de la tension efficace. Au contraire, lorsque les harmoniques ont une amplitude exceptionnelle, les pertes sont nettement plus grandes que sous tension sinusoïdale. Le calcul me permettra ultérieurement de préciser ces conclusions.

CHAPITRE V

PARTIE THÉORIQUE

I. THÉORIE MATHÉMATIQUE. — A. — Une théorie des diélectriques peut être envisagée à deux points de vue indépendants, l'un mathématique, l'autre physique. Le problème que l'on doit résoudre est, en effet, double; il consiste d'une part à rechercher dans le diélectrique quels sont les éléments actifs, d'autre part, à imaginer pour eux des lois simples et à en déduire des résultats vérifiés par l'expérience. Il est indifférent d'en commencer l'étude par l'une ou l'autre de ces parties; je considérerai d'abord l'aspect mathématique de la question.

Une particule électrisée contenue dans un diélectrique est soumise, lorsqu'elle se déplace, à des forces de restitution quasi-élastiques. Pour les fréquences peu élevées dont je m'occupe, ces particules ne peuvent prendre qu'un mouvement apériodique, par suite de l'importance des frottements et de la petitesse relative de leur masse mécanique.

J'examinerai donc le mouvement de charges électriques sensiblement dépourvues de masse mécanique, placées dans un champ de force et soumises de la part du milieu à des réactions élastiques, avec frottement constant ou proportionnel à la vitesse. Je tiens à préciser, dès à présent, que, dans tout ce chapitre, à moins de spécification contraire, *je ne m'occuperai que des charges résiduelles* et des angles de perte correspondants, laissant de côté les charges instantanées proportionnelles aux champs; d'ailleurs, pour éviter toute confusion, j'accentuerai les quantités résiduelles, lorsqu'elles seront différentes des quantités totales.

B. — EXAMEN DE QUELQUES CAS THÉORIQUES. LOIS QUE L'ON PEUT EN DÉDUIRE. — Soit Q' la quantité d'électricité résiduelle qui a traversé une section droite du diélectrique, U la tension entre les armatures.

1° *Milieu non élastique (aucune force de restitution), frottement proportionnel à la vitesse.* — On obtient immédiatement l'équation :

$$\frac{dQ'}{dt} = \lambda U, \quad \frac{1}{\lambda} \text{ étant le coefficient de viscosité.}$$

Si U est constant, Q' croît indéfiniment.

Si U est sinusoïdal, de la forme $U_m \sin \omega t$ par exemple, et si

pour $t = 0$, on a $Q' = 0$ et $\frac{dQ'}{dt} = 0$, l'intégration donne :

$$Q' = \frac{k}{\omega} (I - \cos \omega t).$$

Le cycle obtenu (fig. 45) en portant U en abscisses et Q' en ordonnées est une ellipse dont les axes sont parallèles à ceux des coordonnées,

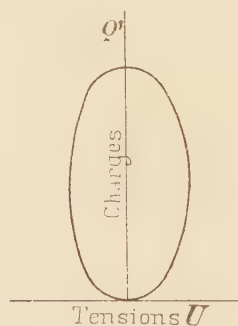


Fig. 45.

données, mais dont le centre n'est pas à l'origine. Sa surface varie en raison inverse de ω ; la puissance absorbée est indépendante de la fréquence; l'angle de perte α' est toujours égal à $\frac{\pi}{2}$.

2° *Milieu élastique, frottement constant.* — L'équation fondamentale est :

$$Q' = kU \pm h, h \text{ étant le coefficient de frottement.}$$

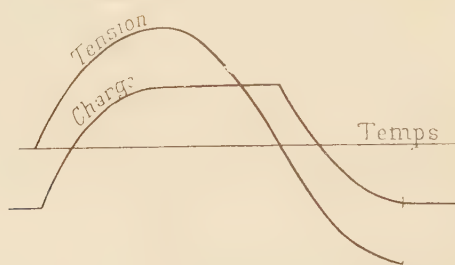


Fig. 46.

En courant alternatif, la charge est représentée en fonction du temps par des portions de sinusôides et de droites horizontales (fig. 46). Le cycle représentant Q' en fonction de U est un parallélogramme indépendant de la fréquence, mais dont la surface n'est pas proportionnelle au carré de la tension (fig. 47).

3° Milieu élastique, frottement proportionnel à la vitesse. —

L'équation à intégrer est : $Q' + \frac{1}{\lambda} \frac{dQ'}{dt} = kU$. $\frac{1}{\lambda}$ étant encore le coefficient de viscosité et k la capacité résiduelle maximum en courant continu.

Si l'on opère en courant continu, si par exemple on décharge le condensateur primitivement chargé sous la tension U , la décharge se fera suivant la loi :

$$Q' = kUe^{-\lambda t}$$

Si, au contraire, on emploie du courant alternatif, la quantité Q' se composera de deux termes, l'un exponentiel, l'autre sinu-

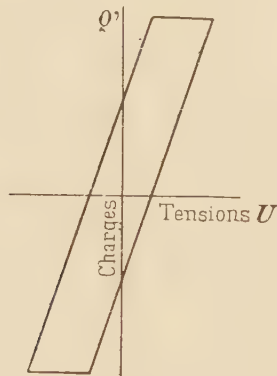


Fig. 47.

soïdal qui est le seul intéressant; on trouve facilement, par substitution la valeur de ce dernier :

$$Q' = Q'_{\max} \sin (\omega t - \alpha') \quad \text{avec } Q'_{\max} = k U_m \cos \alpha' \quad \text{et } \operatorname{tg} \alpha' = \frac{\omega}{\lambda}.$$

Ainsi donc, au bout d'un certain temps, la charge est sinusoïdale et en retard sur la tension. Le cycle représentant Q' en fonction de U finit par devenir une ellipse dont les axes sont inclinés par rapport à ceux des coordonnées, mais dont le centre est à l'origine quelles que soient les conditions initiales; on a vu qu'il n'en était pas de même lorsque l'élasticité était nulle.

L'énergie perdue par cycle est, d'autre part, égale au produit de la tension efficace par la charge active efficace :

$$W = \frac{1}{2} U_m Q'_m \sin \alpha' = \frac{k}{2} U_m^2 \cos \alpha' \sin \alpha' = \frac{k}{4} U_m^2 \sin 2 \alpha'.$$

Elle varie avec la fréquence, s'annule pour $\omega = 0$ et $\omega = \infty$

et passe par un maximum pour $\sin 2 \alpha' = 1$, c'est-à-dire $\alpha' = \frac{\pi}{4}$ et $\omega = \lambda$. Ce maximum est égal à l'énergie qu'aurait emmagasinée au bout d'un temps infini le diélectrique alimenté sous une tension constante dont la valeur serait égale à celle de la tension alternative efficace.

L'angle de perte α a pour limites $\frac{\pi}{2}$ en haute fréquence et zéro à basse fréquence.

C. *Désaccord entre les lois théoriques précédentes et les résultats expérimentaux.* — Il reste maintenant à chercher parmi les lois que je viens d'énoncer celle qui est le mieux vérifiée par l'expérience.

1° Tout d'abord, il faut évidemment écarter le cas où les forces de restitution sont nulles ;

2° Un frottement constant correspond à une perte par cycle constante, ce qui est à peu près vérifié à haute fréquence ⁽¹⁾. Mais la décharge d'un condensateur ne pourrait jamais être complète et son diélectrique resterait toujours polarisé ; cette hypothèse admissible en magnétisme est ici complètement à rejeter.

3° Enfin, un cas qui mérite une discussion plus approfondie est celui où les forces élastiques coexistent avec un frottement proportionnel à la vitesse. Il permet d'expliquer convenablement les déformations du cycle avec la fréquence, mais je dois le rejeter quand même pour les raisons suivantes :

a) *Courant continu.* — Quel que soit le régime auquel a été soumis le condensateur avant sa mise en court-circuit, la décharge devrait être exponentielle.

Or, l'expérience montre que :

Après une tension constante de très longue durée, l'intensité du courant de décharge est généralement représentée par une fonction de la forme : $i = At^n$ ⁽²⁾.

Après plusieurs tensions alternativement positives et négatives,

(1) Certains auteurs superposent dans les diélectriques une « viscosité » et une « hystérésis », la première due à un frottement fonction de la vitesse et surtout sensible à basse fréquence, la deuxième due à un frottement constant et qui existe seule à haute fréquence. Je ne puis adopter cette manière de voir parce que, même à très haute fréquence, le courant reste sinusoïdal et le cycle elliptique.

(2) TRUTTON et PUSS (*Proceedings of the Physical Society*, vol. 20, p. 551, 1907) ont pourtant obtenu expérimentalement une fonction de la forme :

$$i = \frac{t+b}{A}.$$

le courant de décharge peut même changer plusieurs fois de sens.

b) *Courant alternatif*. — La perte d'énergie par cycle devrait passer par un maximum pour $\alpha = \frac{\pi}{4}$.

La puissance perdue devrait devenir constante à haute fréquence.

Or, l'expérience montre que ces résultats ne sont pas vérifiés ; la perte d'énergie par cycle ne passe pas par un maximum pour $\alpha = \frac{\pi}{4}$; la puissance perdue par seconde est sensiblement proportionnelle à la fréquence pour les ondes hertziennes.

D. *Hypothèse complémentaire*. — Les hypothèses précédentes n'ayant pas été confirmées par l'expérience, il convient, sans les compliquer outre mesure, de leur donner plus de souplesse.

Une remarque expérimentale y contribue facilement :

Tous les auteurs qui se sont occupés de mauvais condensateurs ont été frappés des différences notables que présentaient les résultats obtenus avec des diélectriques de même espèce ; des condensateurs de même fabrication et aussi les différentes subdivisions d'un même condensateur ne donnent pas des résultats identiques.

On est donc amené expérimentalement à considérer un condensateur réel comme formé par la réunion d'un certain nombre de condensateurs élémentaires ne possédant pas le même angle de perte. Pour la commodité du calcul et parce que les propriétés du diélectrique ne peuvent pas varier brusquement entre deux points très voisins, je supposerai que le nombre de ces condensateurs est infini.

Ces considérations permettent de retoucher les calculs faits précédemment et je vais d'abord examiner qualitativement les modifications qu'elles y apportent.

Frottement constant. — Le cycle est formé par la superposition d'un nombre infini de parallélogrammes décalés les uns par rapport aux autres et ressemble à une courbe d'aimantation du fer (fig. 48). Il reste indépendant de la fréquence, mais varie en fonction de la tension suivant une loi complexe. Ces résultats sont évidemment contraires à l'expérience.

Frottement proportionnel à la vitesse. — En courant continu, la décharge est représentée par une somme d'exponentielles qui

n'est plus une exponentielle ; en choisissant convenablement les exponentielles élémentaires, on peut obtenir une courbe de décharge qui soit d'accord avec l'expérience.

En courant alternatif, l'intensité est représentée par une somme de sinusoides qui est encore une sinusoïde. Le cycle est encore une ellipse qui se déforme en fonction de la période suivant une loi dont on dispose.

Il reste donc à trouver une fonction convenable pour représenter la capacité du condensateur élémentaire correspondant à un angle de perte déterminé. Cette fonction doit être simple pour que les résultats obtenus puissent être soumis au contrôle de l'ex-

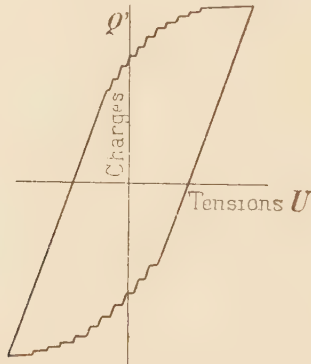


Fig. 48.

périence, posséder une grande valeur pour de faibles angles de perte et tendre vers zéro quand ces derniers tendent vers $\frac{\pi}{2}$; j'ai obtenu des résultats convenables avec une fonction proportionnelle à une certaine puissance de la variable.

E. Développement des calculs. — a) Courant continu. Soit $\frac{1}{\lambda}$ le coefficient de viscosité d'un condensateur élémentaire, alimenté sous la tension U. Soit U. dA la valeur initiale du courant de charge ⁽¹⁾ ; au bout d'un temps t ce courant élémentaire aura pour valeur

$$di' = U. dA. e^{-\lambda t}$$

⁽¹⁾ Pour fixer les idées, si le condensateur élémentaire présentant de la viscosité est assimilable à une capacité parfaite C en série avec une résistance R, on a : $dA = \frac{1}{R}$ et $\lambda = \frac{1}{CR}$.

L'intensité totale I dans le condensateur réel est la somme de toutes ces intensités élémentaires :

$$I = \int_{\lambda=0}^{\infty} U \cdot dA \cdot e^{-\lambda t}.$$

Pour aller plus loin, il faut relier dA à λ . Pour obtenir finalement une loi conforme à l'expérience (1), je suis conduit à poser :

$$dA = M \lambda^{n-1} d\lambda \quad \text{d'où} \quad I = MU \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} \lambda^{n-1} d\lambda.$$

Cette intégration s'effectue au moyen du changement de variable $\lambda t = u$; j'obtiens :

$$I = MU \int_0^{\infty} e^{-u} \left(\frac{u}{t}\right)^{n-1} \frac{du}{t} = MU t^{-n} \int_0^{\infty} e^{-u} u^{n-1} du = MU \Gamma(n) t^{-n}.$$

en représentant par Γ l'intégrale eulérienne de seconde espèce.

Pour un condensateur déterminé, $MU \Gamma(n)$ étant constant, le courant varie bien proportionnellement à la puissance- n du temps. Je puis donc considérer la fonction λ^{n-1} comme acceptable, puisqu'en courant continu elle me permet de retrouver les résultats expérimentaux. Il ne me reste plus qu'à l'appliquer en alternatif.

b). *Courant alternatif*. Soit $U_m \sin \omega t$ la tension appliquée au condensateur ; l'intensité maximum en alternatif est $\sin \alpha'$ fois plus grande que l'intensité initiale en continu ; l'intensité élémentaire maximum est donc :

$$di' = U_m dA \sin \alpha'.$$

Les intensités élémentaires active en phase avec la tension et réactive en quadrature, s'obtiennent en multipliant la précédente par $\sin \alpha'$ et $\cos \alpha'$.

$$di_a = U_m \cdot dA \cdot \sin^2 \alpha' = U_m \frac{dA}{1 + \frac{\lambda^2}{\omega^2}}.$$

$$di_r = U_m dA \cdot \sin \alpha' \cos \alpha' = \frac{U_m}{\omega} \cdot \frac{\lambda dA}{1 + \frac{\lambda^2}{\omega^2}}.$$

Si l'on relie dA à λ par la relation $dA = M \lambda^{n-1} d\lambda$ on obtient pour les intensités totales :

$$I_a = MU_m \int_0^{\infty} \frac{\lambda^{n-1} d\lambda}{1 + \frac{\lambda^2}{\omega^2}}, \quad I_r = \frac{MU_m}{\omega} \int_0^{\infty} \frac{\lambda^n d\lambda}{1 + \frac{\lambda^2}{\omega^2}}.$$

(1) En posant $dA = M e^{-b\lambda} d\lambda$ on obtiendrait la loi en $\frac{A}{t+b}$ trouvée expérimentalement par Trutton et Russ.

Pour calculer I_a je pose : $\lambda^2 = \omega^2 u$,

$$I_a = \frac{M U_m}{2} \omega^n \int_0^\infty u^{\frac{n}{2}-1} \frac{du}{1+u} = \frac{M U_m}{2} \omega^n B\left(\frac{n}{2}, 1-\frac{n}{2}\right) \\ = \frac{M U_m}{2} \omega^n \Gamma\left(\frac{n}{2}\right) \Gamma\left(1-\frac{n}{2}\right)$$

en désignant par B l'intégrale eulérienne de 1^o espèce. De même :

$$I_r = \frac{M U_m}{2} \omega^n \int_0^\infty u^{\frac{n}{2}-1} \frac{du}{1+u} = \frac{M U_m}{2} \omega^n B\left(\frac{1+n}{2}, 1-\frac{n}{2}\right) \\ = \frac{M U_m}{2} \omega^n \Gamma\left(\frac{1+n}{2}\right) \Gamma\left(1-\frac{n}{2}\right)^{(1)}.$$

Les calculs précédents font apparaître immédiatement un certain nombre de relations simples entre les quantités résiduelles :

L'intensité active I_a et par suite la puissance dissipée par viscosité sont proportionnelles à la n^e puissance de la fréquence.

L'intensité réactive I_r varie de la même manière.

L'angle de perte α' (relatif aux résidus seulement) est indépendant de la fréquence.

Les intensités alternatives active et réactive correspondant à la période T sont proportionnelles à l'intensité continue I_c au bout du temps T ; les coefficients de proportionnalité, pour des tensions maximum égales sont :

$$\frac{I_a}{I_c} = \frac{(2\pi)^n \Gamma\left(\frac{n}{2}\right) \Gamma\left(1-\frac{n}{2}\right)}{2 \Gamma(n)} \\ \frac{I_r}{I_c} = \frac{(2\pi)^n \Gamma\left(\frac{1+n}{2}\right) \Gamma\left(1-\frac{n}{2}\right)}{2 \Gamma(n)}.$$

Le rapport des charges ou des capacités se déduit facilement du rapport des intensités en le multipliant par $\frac{2\pi}{1-n}$. On obtient

(1) J'aurais pu poser directement :

$$I_a = \int_0^\infty \int_0^\infty U_m \omega \sin \omega t \cdot M \lambda^{n-1} \cdot e^{-\lambda t} dt d\lambda, \\ I_r = \int_0^\infty \int_0^\infty U_m \omega \cos \omega t \cdot M \lambda^{n-1} \cdot e^{-\lambda t} dt d\lambda.$$

Le calcul tel que je l'ai conduit revient à commencer l'intégration par rapport à dt. En commençant par d λ on obtiendrait les formules :

$$I_a = \frac{M U_m \omega^n}{2 \cos(1-n)\frac{\pi}{2}} \Gamma_1 = \frac{M U_m \omega^n \Gamma(n) \Gamma(1-n) \cos(1-n)\frac{\pi}{2}}{2}$$

qui peuvent être plus commodes dans certains cas.

ainsi entre la composante C_r en phase avec la tension de la capacité résiduelle en courant alternatif, la composante C_a en quadrature avec la tension de la capacité en courant alternatif, et la capacité résiduelle C'_c en courant continu les relations :

$$\frac{C_a}{C'_c} = \frac{(2\pi)^{n-1} (1-n)! \left(\frac{n}{2}\right)! \left(1-\frac{n}{2}\right)!}{2! \Gamma(n)}$$

$$\frac{C_r}{C'_c} = \frac{(2\pi)^{n-1} (1-n)! \left(\frac{1-n}{2}\right)! \left(\frac{1-n}{2}\right)!}{2! \Gamma(n)}$$

En vue de faciliter l'application de ces formules, j'ai calculé pour quelques valeurs de n les rapports précédents (fig. 49).

n	$\frac{I_a}{I_c}$	$\frac{I_r}{I_c}$	$\frac{C_a}{C'_c}$	$\frac{C_r}{C'_c}$	$\lg x$
0	1	0	0,16	0	∞
0,1	1,27	0,202	0,18	0,027	6,3
0,2	1,60	0,52	0,20	0,062	3,08
0,3	1,97	1,02	0,22	0,113	1,93
0,4	2,50	1,82	0,24	0,175	1,37
0,5	3,28	3,28	0,26	0,26	1
0,6	3,95	5,50	0,25	0,345	0,72
0,7	4,95	9,50	0,235	0,46	0,515
0,8	6,22	21,2	0,198	0,61	0,295
0,9	7,83	49,2	0,125	0,78	0,160
1	9,85	∞	0	1	0

Ainsi, l'étude en continu d'un condensateur permet de prédéterminer sa capacité et ses pertes en alternatif.

Pour fixer les idées et préciser les notations, je vais appliquer la théorie précédente à un condensateur à mica étudié en courant continu par M. Bouty (1) ; sa capacité était représentée en fonction du temps par la formule :

$$C = I + 0,034 T^{0,1} \text{ microfarads.}$$

On a ici $1-n = 0,1$ et le tableau donne pour $n = 0,9$ les rapports suivants :

$$\frac{C_a}{C'_c} = 0,125 \qquad \frac{C_r}{C'_c} = 0,78$$

La capacité totale réactive en courant alternatif (charge instantanée et résidus) est donc, pour la période T :

$$C = I + 0,034 \times 0,78 \times T^{0,1}.$$

(1) BOUTY. *Annales de Chimie et de Physique*, 6^e série, tome XXIV, p. 391, 1891.

La capacité totale définie au balistique ne diffère de la précédente que d'une quantité insignifiante.

L'angle de perte réel, rapporté aux capacités précédentes a pour tangente :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{C_a}{1 - C_r} = \frac{0,034 \times 0,125 \times T^{0,1}}{1 - 0,034 \times 0,78 \times T^{0,1}} = \frac{0,00425}{0,0265 + T^{0,1}}.$$

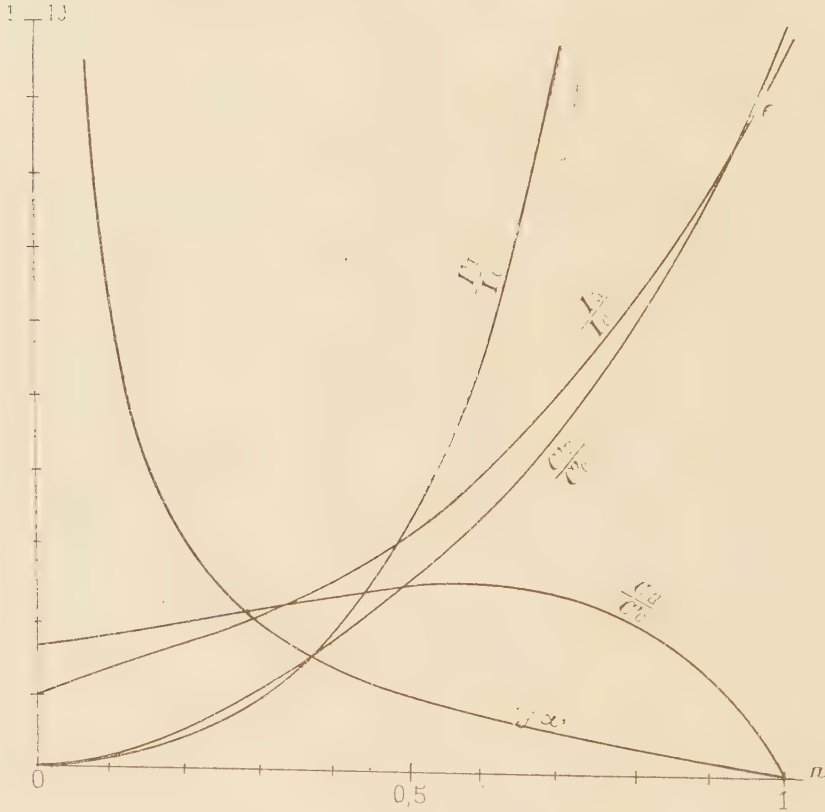


Fig. 49.

Pour les fréquences 100 000, 1, et 0,001, ces formules donnent les nombres suivants :

T	0,00001	1	1 000
C	1,010	1,026	1,068
$\operatorname{tg} \alpha$	0,00132	0,00415	0,0081

II. VÉRIFICATION DE LA THÉORIE MATHÉMATIQUE : COMPARAISON DES CAPACITÉS EN COURANTS CONTINU ET ALTERNATIF. — A. Je viens d'établir théoriquement que les pertes sont proportionnelles à la n^{e} puissance de la fréquence; cette conclusion est conforme

à mes résultats expérimentaux. Il me reste, pour vérifier les calculs précédents à montrer que le coefficient de proportionnalité mesuré est bien celui que prévoit la théorie. Cette vérification peut se faire soit sur les intensités, soit sur les capacités. J'ai opéré sur ces dernières, qui sont directement obtenues avec les méthodes usuelles.

Pour les fréquences 50 et 870, j'ai utilisé le pont de Wien ; l'appareil de zéro était un galvanomètre de résonance dans le premier cas, un téléphone dans le second. Pour la fréquence 2, j'ai employé la méthode du balistique.

Enfin, les mesures en courant continu ont été faites au moyen d'un contact tournant de grandes dimensions. Celui-ci chargeait le condensateur durant $\frac{29}{30}^{\circ}$ de tour puis le déchargeait durant $\frac{1}{30}^{\circ}$ de tour, dans le balistique fonctionnant en ampèremètre ; le temps de la décharge était déduit de la vitesse du moteur d'entraînement ; l'ensemble était ensuite étalonné avec un condensateur à mica. Cependant, pour des durées supérieures à une seconde, la commutation était effectuée à la main. Naturellement, les résultats n'étaient relevés qu'après quelques minutes de fonctionnement.

Il convient de ne procéder qu'en dernier lieu aux mesures en courant continu, sans quoi les charges résiduelles emmagasinées pendant cet essai rendraient impossibles les mesures à la fréquence 2.

B. — Condensateur N° 12 (papier paraffiné)

1° Courant alternatif (résultats expérimentaux)

Fréquence	Capacité	$\lg \alpha$
870 p/s	1,85 μ F	0,053
50	2,11	0,110
2	2,52	0,205

Il est à remarquer que la capacité obtenue au pont n'est pas celle que fournirait le balistique ; j'ai montré que pour déterminer cette dernière, il suffisait, lorsque les fuites sont négligeables, de multiplier par $\cos \alpha$ la capacité mesurée. Cette correction est ici négligeable, mais il faudrait en tenir compte pour de plus mauvais condensateurs.

2° Courant continu (résultats expérimentaux)

Durée de la décharge en sec.	$\frac{I}{250}$	$\frac{I}{40}$	I	10
Capacité en μF	2,38	2,92	4,5	6,2

Ces essais font seulement connaître la somme C de la capacité résiduelle et de la capacité instantanée C_0 . Afin de déterminer cette dernière, il eût été intéressant de faire un essai à très haute fréquence, mais c'était malheureusement impossible pour une capacité si considérable. J'en ai été réduit à essayer plusieurs valeurs de C_0 jusqu'à ce que, en coordonnées logarithmiques, la courbe des capacités résiduelles en courant continu $C - C_0 = f(T)$ soit sensiblement rectiligne. J'ai obtenu ainsi : $C_0 = 1,7 \mu F$ et $n = 0,65$. Pour vérifier la théorie, je vais, en partant de ces résultats, obtenus en courant continu, calculer la capacité et l'angle de perte en alternatif, puis je comparerai les valeurs ainsi calculées aux résultats expérimentaux :

À cette valeur de n correspondent les rapports suivants :

$$\frac{C_a}{C_c} = 0,245 \qquad \frac{C_r}{C_c} = 0,40.$$

Les capacités résiduelles en courant continu correspondant à $\frac{1}{2}$ sec., $\frac{1}{50^e}$ de sec. et à $\frac{1}{870^e}$ de sec. s'obtiennent par interpolation ; elles ont pour valeur :

Temps en secondes	$\frac{1}{870}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{2}$
C_c en μF	0,48	1,1	2,4

On en déduit les valeurs théoriques en courant alternatif :

Fréquence p/s	Capacité totale réactive en μF	Capacité totale en μF	tg α
870	$1,7 + 0,48 \times 0,4 = 1,90$	$\sqrt{1,90^2 + (0,245 \times 0,48)^2} = 1,90$	$\frac{0,48 \times 0,245}{1,90} = 0,062$
50	$1,7 + 1,1 \times 0,4 = 2,14$	$\sqrt{2,14^2 + (0,245 \times 1,1)^2} = 2,16$	$\frac{1,1 \times 0,245}{2,16} = 0,125$
2	$1,7 + 2,4 \times 0,4 = 2,66$	$\sqrt{2,66^2 + (0,245 \times 2,4)^2} = 2,78$	$\frac{2,4 \times 0,245}{2,78} = 0,21$

On vérifie que ces nombres, quoique n'étant pas identiques à ceux que donne la mesure directe ne s'en écartent pourtant pas beaucoup (fig. 50).

C. Condensateur N° 5 (papier paraffiné)

1° Courant alternatif

Fréquence	Capacité	$\text{tg } \alpha$
p.s	$\mu \text{ F}$	
870	0,91	0,10
50	1,64	0,53
2	2,95	1,05

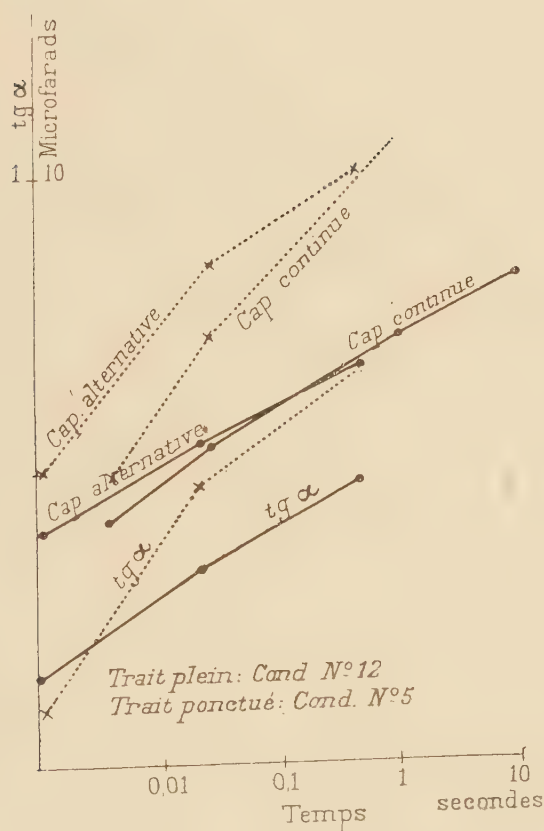


Fig. 50.

Il convient d'apporter une correction à la valeur mesurée pour 50 p.s ; en la multipliant par $\cos \alpha$, on obtient 1,42.

2° Courant continu

Durée de la décharge en seconde	$\frac{1}{250}$	$\frac{1}{40}$	1	10
Capacité en $\mu \text{ F}$	1,72	3,65	14,7	41,5

J'en ai déduit comme précédemment :

$$C_0 = 0,75 \mu F \quad n = 0,45$$

Pour cette valeur de n on a :

$$\frac{C_a}{C_r} = 0,25 \quad \frac{C'_r}{C_c} = 0,22$$

D'autre part, on obtient par interpolation les valeurs suivantes en courant continu :

Temps en seconde	$\frac{1}{870}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{2}$
C_c en μF	0,4	2,5	12

d'où l'on déduit par le calcul :

Fréquence p/s	Capacité totale réactive en μF	Capacité totale en μF	tg α
870	$0,75 + 0,4 \times 0,22 = 0,84$	$\sqrt{0,84^2 + (0,4 \times 0,25)^2} = 0,84$	$\frac{0,4 \times 0,25}{0,84} = 0,119$
50	$0,75 + 2,5 \times 0,22 = 1,30$	$\sqrt{1,30^2 + (2,5 \times 0,25)^2} = 1,45$	$\frac{2,5 \times 0,25}{1,30} = 0,48$
2	$0,75 + 12 \times 0,22 = 3,40$	$\sqrt{3,40^2 + (12 \times 0,25)^2} = 4,5$	$\frac{12 \times 0,25}{3,40} = 0,88$

D. *Remarque.* — La courbe représentant la capacité en courant continu n'est pas rigoureusement rectiligne ; il ne pourrait d'ailleurs en être ainsi que dans un espace assez restreint, la formule en t^{1-n} d'origine empirique n'étant valable qu'entre certaines limites.

La charge emmagasinée en continu est en effet égale à $\frac{MU'(n)t^{1-n}}{1-n}$. Si cette quantité est finie pour les valeurs finies de t , c'est que le coefficient de t^{n-1} est fini. Donc, elle est infinie pour $t = 0$ si $n \geq 1$, pour $t = \infty$ si $n \leq 1$; or, cela est physiquement impossible, un volume limité de diélectrique ne pouvant emmagasiner une quantité infinie d'électricité.

Une variation lente de n s'impose donc. Il en résulte un peu d'incertitude sur la valeur à adopter pour n . Malgré cela, l'accord entre les nombres calculés et observés est satisfaisant, surtout si l'on tient compte de la difficulté des mesures et de la diversité des méthodes employées.

Parmi les relations établies, celle qui relie C_a et C'_r est la plus intéressante aux fréquences usuelles parce que dans ces conditions, les mesures sont beaucoup plus faciles en courant alternatif qu'en courant continu. Au contraire, pour des temps

relativement longs, il est extrêmement facile de mesurer la capacité en courant continu et d'en déduire les pertes en courant alternatif.

III. APPLICATION DE LA THÉORIE MATHÉMATIQUE. — 1. *Etude théorique de l'influence des harmoniques.* — 1° L'expérience ayant vérifié avec une approximation suffisante les lois théoriques précédemment établies, on a le droit de les appliquer à la solution d'un certain nombre de problèmes ; en particulier, il est intéressant de rechercher l'influence que peut avoir sur les pertes la forme de la courbe de tension.

On peut évidemment recommencer pour chaque fonction particulière un calcul analogue au précédent, mais il est en général plus simple de la développer en série de Fourier.

On remarque immédiatement que, à tension efficace égale, les pertes sont d'autant plus élevées que l'importance des harmoniques est plus grande. En effet, la perte totale est la somme des pertes produites par chaque harmonique ; dans le cas limite où n serait nul, ce qui équivaldrait à remplacer le condensateur par une résistance, cette perte ne dépendrait que de la tension efficace ; mais comme en réalité n est toujours supérieur à zéro, les pertes dues aux harmoniques, proportionnelles à la n^{e} puissance de leur rang sont exagérées. La fonction pour laquelle les pertes sont minimum, à tension efficace égale, est donc la sinusoïde.

Dans le courant du calcul, on rencontre des expressions dont la valeur devient illusoire pour certaines valeurs de ω et de n . Il est inutile de lever l'indétermination, ces cas limites n'ayant aucune signification physique. Les formules correspondantes, d'origine empirique, ne sont d'ailleurs plus valables, l'expression ω^n devenant infinie pour $\omega = 0$ ou $\omega = \infty$ quel que soit n et ce dernier nombre ne pouvant atteindre les limites 0 ou 1 sans donner au condensateur une capacité infinie. Je me bornerai dans ces conditions, à calculer les valeurs numériques des quantités intéressantes pour des valeurs de n voisines de 0 et de 1, par exemple 0,1 et 0,9.

Pour préciser, je considérerai les cas où la tension d'alimentation peut être représentée par une série de triangles ou de rectangles.

2° Triangles isocèles (*tension linéaire périodiquement inversée*). — Dans ce cas, la tension est égale à l'expression :

$$i(t) = \frac{8 I_m}{\pi^2} \left[\sin \omega t - \frac{1}{3^2} \sin 3 \omega t + \frac{1}{(2k+1)^2} \sin (2k+1) \frac{\pi}{2} \sin (2k+1) \omega t \right].$$

La tension maximum du $(2k+1)^{\circ}$ harmonique est :

$$U_{m(2k+1)} = \frac{8 U_m}{\pi^2} \times \frac{1}{(2k+1)^2}.$$

Son intensité wattée a pour valeur maximum :

$$I_{a(2k+1)} = \frac{M}{2} \cdot \Gamma\left(\frac{n}{2}\right) \cdot \Gamma\left(1 - \frac{n}{2}\right) \left[(2k+1)\omega\right]^n \cdot \frac{8 U_m}{\pi^2} \cdot \frac{1}{(2k+1)^2}$$

La perte d'énergie correspondante est donc :

$$W_{(2k+1)} = \frac{1}{2} U_{m(2k+1)} \times I_{m(2k+1)} = \frac{M}{4} \cdot \Gamma\left(\frac{n}{2}\right) \cdot \Gamma\left(1 - \frac{n}{2}\right) \omega^n \left(\frac{8 U_m}{\pi^2}\right)^2 \cdot (2k+1)^{n-4}.$$

La perte d'énergie pour la tension totale s'obtient en faisant la somme arithmétique de toutes les pertes partielles.

$$W = \frac{M}{4} \cdot \Gamma\left(\frac{n}{2}\right) \cdot \Gamma\left(1 - \frac{n}{2}\right) \omega^n \left(\frac{8 U_m}{\pi^2}\right)^2 \left[1 + 3^{n-4} + \dots + (2k+1)^{n-4}\right].$$

D'autre part, pour des triangles isocèles, le rapport entre la tension efficace et la tension maximum est $\frac{1}{\sqrt{3}}$; pour une sinusoïde, ce rapport est égal à $\frac{1}{\sqrt{2}}$. Ainsi, pour une même tension maximum, le rapport entre les carrés des tensions efficaces des triangles et de la sinusoïde est $\frac{2}{3}$.

Revenons maintenant à l'expression de W et calculons le rapport entre cette énergie et celle qui serait dissipée sous une tension sinusoïdale de même valeur maximum U_m . Ce rapport est :

$$\frac{\frac{M}{4} \cdot \Gamma\left(\frac{n}{2}\right) \cdot \Gamma\left(1 - \frac{n}{2}\right) \omega^n \left(\frac{8 U_m}{\pi^2}\right)^2 \left[1 + 3^{n-4} + \dots + (2k+1)^{n-4}\right]}{\frac{M}{4} \cdot \Gamma\left(\frac{n}{2}\right) \cdot \Gamma\left(1 - \frac{n}{2}\right) \omega^n U_m^2} = \frac{64}{\pi^4} \left[1 + 3^{n-4} + \dots + (2k+1)^{n-4}\right].$$

La série entre parenthèses est rapidement convergente pour $0 < n < 1$; sa limite est :

$$1,015 \text{ pour } n = 0 \text{ et } 1,05 \text{ pour } n = 1.$$

Le rapport des pertes est donc pour $n = 0$:

$$\rho = \frac{64}{\pi^4} \times 1,015 = \frac{2}{3}$$

ce qui était à prévoir; pour $n = 1$, il devient:

$$\rho = \frac{64}{\pi^4} \times 1,05 = 0,69$$

résultat très peu différent.

Ainsi, si l'on soumet successivement le même condensateur à deux tensions de même valeur efficace, l'une sinusoïdale, l'autre triangulaire, les pertes dans les deux cas sont sensiblement les mêmes.

Remarque. — Le développement d'une tension parabolique ne diffère de celui d'une tension triangulaire que parce que les signes sont tous positifs au lieu d'être alternés. Il s'ensuit que les pertes sont rigoureusement identiques pour des tensions triangulaires et pour des tensions paraboliques de même valeur efficace.

3° Rectangles (*Tension continue périodiquement inversée*). — Le développement de cette tension en série de Fourier est :

$$f(t) = \frac{4}{\pi^2} \frac{U_m}{\omega} \left[\sin \omega t - \frac{1}{3} \sin 3 \omega t + \dots + \frac{1}{(2k+1)} \sin (2k+1) \omega t \dots \right]$$

Le carré de la valeur efficace est évidemment deux fois plus grand pour ces rectangles que pour la sinusoïde qui a même ordonnée maximum.

D'autre part, les pertes subies par un même condensateur alimenté successivement par ces deux tensions sont dans le rapport:

$$\rho = \frac{16}{\pi^4} \left[1 - \frac{1}{3^4} + \dots + \frac{1}{(2k+1)^4} - \dots \right]$$

Cette série ne converge plus aussi rapidement que la précédente; il est pourtant facile d'en obtenir une valeur approchée en l'assimilant à partir des termes d'un rang convenable à l'intégrale.

$$\int_0^\infty x^{n-2} dx = \frac{x^{n-1}}{1-n}$$

On obtient ainsi le tableau :

Valeur de n	0	0,1	0,9	1
Valeurs de ρ	2	2,34	16	∞

Ainsi donc, si deux condensateurs, l'un pour lequel $n = 0,1$, l'autre pour lequel $n = 0,9$ présentent des pertes égales sous tension sinusoïdale, le dernier sera, sous tension rectangulaire, le siège de pertes $\frac{16}{2,34} = 7$ fois plus importantes que le premier.

Mais, il ne faut pas perdre de vue que ces deux condensateurs quoique ayant les mêmes pertes pour l'onde fondamentale, ont des capacités résiduelles bien différentes. Leurs angles de perte résiduels ont en effet comme tangentes :

$$\text{Pour le premier : } \frac{\Gamma(0,05) \cdot \Gamma(0,95)}{\Gamma(0,55) \cdot \Gamma(0,45)} = 6,3,$$

$$\text{Pour le second : } \frac{\Gamma(0,55) \cdot \Gamma(0,45)}{\Gamma(0,05) \cdot \Gamma(0,95)} = \frac{1}{6,3}.$$

de sorte que le second a pour l'onde fondamentale une capacité résiduelle dévattée $\overline{6,3^2} = 39$ fois plus grande que le premier. Naturellement, comme chaque condensateur possède en outre une capacité instantanée, on ne peut donner aucune indication sur la capacité totale.

B. *Conclusion.* — Je n'ai développé les calculs précédents que dans deux cas extrêmes. Le premier correspond seul à la réalité industrielle, les courbes fournies par les alternateurs usuels ne présentant jamais de portions verticales et les séries rencontrées dans le calcul étant par suite rapidement convergentes.

Dans les alternateurs industriels, la répartition discontinue des conducteurs induits le long de l'entrefer et la forme des pièces polaires donnent à la courbe de tension une allure plus ou moins polygonale. Son développement en série de Fourier affecte à chaque terme un coefficient qui varie en raison inverse du carré de son rang. Les conclusions sont donc analogues à celles que j'ai obtenues avec le triangle : pour les valeurs usuelles de n , l'erreur que l'on commet en considérant les pertes comme ne dépendant que de la valeur efficace est de l'ordre de 1 pour 100.

Les machines usuelles fournissent également à vide des harmoniques de denture mais ceux-ci sont, en charge, rapidement étouffés par les courants de Foucault et court-circuités par les moteurs asynchrones du réseau d'utilisation ; ils ne semblent donc pas modifier sensiblement la conclusion précédente.

Bien entendu, celle-ci n'est valable que dans les cas usuels ; elle est en défaut par exemple si l'on produit une tension bien rectangulaire avec une pile et un commutateur tournant ou encore si un harmonique de la tension appliquée entre en résonance ; dans ces deux cas, d'ailleurs, l'intensité devient très grande à **certain**s moments de la période et la perte dans les armatures est également à considérer.

Ces déductions théoriques sont bien d'accord avec les résultats expérimentaux obtenus au paragraphe VII du chapitre IV.

IV. THÉORIE PHYSIQUE. — Plusieurs théories physiques de la viscosité ont été proposées ; toutes, convenablement modifiées, peuvent satisfaire aux lois mathématiques que j'ai données précédemment ; aussi ne faut-il pas compter sur les résultats quantitatifs pour choisir entre elles.

La cause de la viscosité est évidemment un déplacement de charges électriques, mais cette conductibilité peut être localisée soit dans l'atome, soit dans la molécule, soit dans un ensemble de molécules.

A. Par analogie avec ce qui se passe pour les vibrations lumineuses, on a voulu voir la cause de la viscosité à l'intérieur même de l'atome ; cette hypothèse ne peut que difficilement se soutenir. Il est en effet peu vraisemblable d'imposer la même cause à des effets correspondant à des longueurs d'onde de quelques Angströms pour les uns, de quelques millions de kilomètres pour les autres. Il faudrait imaginer des électrons spéciaux, et encore serait-il difficile d'expliquer leur amortissement énorme.

En outre, alors que pour des fréquences élevées (rayons X et rayons lumineux), l'absorption d'un corps est caractéristique de ses atomes ou de sa molécule, il n'en est rien pour les oscillations électriques ; il est impossible d'attribuer à chaque corps un coefficient de viscosité défini. Les pertes dépendent surtout de la pureté de l'échantillon étudié et proviennent sans aucun doute des impuretés dans le cas général.

A mon avis donc, toutes les absorptions dont le siège est à l'intérieur de l'atome ne peuvent intéresser que des ondes plus courtes que les ondes hertziennes.

B. Mais si un électron peut grouper autour de lui un ou plu-

sieurs atomes, l'ensemble ainsi constitué formera, à l'intérieur de la molécule, un élément de masse notable, susceptible par conséquent de n'entrer en vibration que pour des oscillations relativement lentes ; c'est précisément ce qui a lieu pour la glycérine, l'eau, l'alcool et la plupart des substances dont la molécule contient OH.

L'existence d'ions est mise en évidence ⁽¹⁾ dans ces corps par l'augmentation énorme du pouvoir inducteur K et de l'indice de réfraction $\sqrt{K}$ lorsque l'on passe des oscillations infra-rouges aux oscillations hertziennes. Pour les premières, la fréquence est trop grande pour que le déplacement des ions puisse prendre une amplitude notable et la polarisation qui en résulte est insensible. Pour les oscillations hertziennes de grande longueur d'onde, au contraire, le déplacement des ions suit docilement la variation du champ électrique ; il n'existe aucune différence de phase entre eux et par suite pas d'absorption. Mais, pour une région intermédiaire, celle qui correspond à l'augmentation rapide de K , le déplacement des ions est nettement en retard sur l'intensité du champ et il en résulte des pertes notables ⁽²⁾.

Suivant la nature et la mobilité des ions, la bande intéresse des longueurs d'onde différentes ⁽³⁾ ; elle doit se trouver au-dessous de 1 mm pour l'eau, entre 1 mm et 10 cm pour l'alcool, entre 1 cm et 10 m pour la glycérine, et au-dessus de 20 m pour la glace. J'ai pu la mettre en évidence pour la glycérine aux environs de 5 m. On doit pouvoir en faire autant, à des fré-

(¹) Lorsque la dissociation n'a pas lieu (état gazeux ou basse température), le pouvoir inducteur à basse fréquence reste compris entre 2 et 3.

(²) Les équations établies dans la théorie électromagnétique de la lumière s'appliquent ici sans aucune modification puisqu'elles ne supposent rien sur la nature de l'élément polarisé ; elles permettent, en particulier, d'étudier à l'intérieur de la bande d'absorption les variations du pouvoir inducteur et de l'angle de perte.

(³) Valeurs de $K = n^2$ pour différentes longueurs d'onde :

EAU		ALCOOL		GLYCÉRINE		GLACE	
λ_{cm}	K	λ_{cm}	K	λ_{cm}	K	λ_{cm}	K
∞	76	∞	26	1 000	56,2	∞	79
35 000	80	200	24,4	200	39,1	2 000	2,5
205	80,6	75	23	75	24,5	14	3,10
3,2	85	5	10,2	8,5	14,1	0,00005	1,72
0,4	90,2	0,4	5	0,4	2,6		
0,00005	1,77	0,00005	1,85	0,00005	2,16		

quences plus élevées pour l'eau et l'alcool ⁽¹⁾; de même pour la glace à des fréquences plus basses, à condition d'opérer sur un échantillon assez pur pour ne pas être gêné par des conductibilités parasites.

C. La cause de la viscosité peut encore être cherchée dans un retard à l'orientation des molécules. Cette explication ne semble pas valable en général, l'orientation des molécules étant un phénomène très rapide (Le phénomène de Kerr disparaît en moins de 10^{-8} seconde) tandis que la viscosité, même pour les liquides, est extrêmement nette pour des fréquences supérieures à 1 000. Pourtant, si l'on considère que le champ électrique produit des déformations mécaniques et que certains corps possèdent une viscosité mécanique notable, on conçoit qu'il puisse en résulter pour des oscillations rapides une perte d'énergie appréciable. Tel pourrait être par exemple le cas du caoutchouc. Il est difficile de se prononcer sur la validité de cette hypothèse, dans l'ignorance où l'on est des lois de la viscosité mécanique pour des fréquences rapides; j'ai fait toutefois remarquer que la tension mécanique du caoutchouc faisait varier dans de notables proportions son angle de perte.

D. On peut enfin admettre, et cette théorie s'impose à basse fréquence, que la viscosité est due à une conductibilité extramoléculaire. Maxwell qui s'est occupé le premier de la question a montré que si un diélectrique se compose de plusieurs couches dont la conductibilité ne varie pas proportionnellement au pouvoir inducteur, il présente le phénomène de charges résiduelles. Hess a repris cette théorie et, pour la simplifier, a considéré un condensateur réel comme formé par deux condensateurs en série dont l'un shunté par une résistance ⁽²⁾.

Ces conductibilités sont évidemment électrolytiques et l'on est conduit naturellement à considérer les diélectriques à résidus comme hétérogènes : dans le diélectrique pur absolument isolant, sont occluses ou dissoutes des traces de matière électrolytique; pour la plupart des corps, plus ou moins poreux, ces impuretés sont constituées par de l'humidité, mais il peut en être autre-

(1) Ces phénomènes ont été mis en évidence pour des ondes amorties en particulier par Barbillion (Sur la dispersion électrique, Thèse, Paris 1899).

(2) Cette simplification doit être rejetée; j'ai montré précédemment que pour obtenir théoriquement des lois vérifiées par l'expérience, il fallait considérer le condensateur réel comme formé d'un grand nombre de condensateurs élémentaires.

ment ; il y a lieu de penser par exemple que dans le verre, le silicate de soude joue le rôle de conducteur ⁽¹⁾ au milieu de silicates doubles parfaitement isolants.

Pour des ondes suffisamment longues, les ions électrolytiques se déplacent sous l'influence du champ, malgré la résistance qu'ils éprouvent de la part des molécules du corps neutre. Certains sont finalement arrêtés et, s'accumulant au fond de cavités plus ou moins volumineuses donnent naissance aux charges résiduelles ; d'autres réussissent à atteindre les armatures et sont la cause des fuites.

Ce qui justifie cette manière de voir, c'est l'étroite dépendance qui unit les fuites et les résidus. Toute cause qui fait varier les uns influe sur les autres ⁽²⁾ : l'humidité augmente, à la fois et dans de grandes proportions, les résidus et les fuites ; lorsqu'un corps devient pâteux sous l'influence d'une élévation de température, les fuites et les résidus augmentent ensemble, puis lorsqu'il fond, les résidus se transforment en fuites ; enfin, l'application soutenue d'une tension constante peut, dans certains condensateurs, éliminer à la fois les fuites et les résidus.

Les lois qui régissent le déplacement des impuretés électrolytiques dépendent essentiellement de la constitution physique du diélectrique : celui-ci peut présenter des poches plus ou moins nettes, reliées par des fissures de dimensions très variables et plus ou moins inclinées sur la direction du champ. Il s'ensuit que les divers circuits ainsi formés ont des constantes de temps très différentes et il est possible, en faisant certaines hypothèses sur la répartition des impuretés, de donner une raison physique aux lois mathématiques précédemment obtenues ⁽³⁾. Il semble prématuré d'entreprendre actuellement cette étude et l'on peut se borner à quelques remarques :

Lorsque les fissures conductrices ont une faible longueur, comme par exemple dans le mica où la présence de plans de cli-

⁽¹⁾ Dans l'électrolyse du verre, le silicate de soude satisfait aux lois quantitatives de Faraday. Les différentes sortes de verres sont d'autant meilleures qu'elles contiennent moins de soude ou de potasse.

⁽²⁾ Au contraire, ces causes sont sans action sensible sur le pouvoir inducteur instantané et sur l'indice de réfraction.

⁽³⁾ Mon exposé mathématique indique que les pertes totales sont proportionnelles à ω^n (viscosité) et à ω^n (fuites). L'expérience montre que c'est suffisant en première approximation. Il faudrait probablement, pour s'approcher davantage de la réalité, écrire $\Sigma \omega^n$ en donnant à n plusieurs valeurs différentes ou bien choisir une autre fonction. Mais il paraît inutile de construire une théorie plus approchée tant que, expérimentalement, on ne connaîtra pas mieux les diélectriques.

vage perpendiculaires à la direction du champ est un obstacle à des déplacements importants d'ions, les constantes de temps faibles prédominent, l'exposant n est voisin de 1 et il y a peu de fuites. Quant au contraire, le corps étudié est sensiblement isotrope, comme par exemple le verre, les déplacements d'impuretés peuvent être considérables, n est peu différent de 0 et les fuites sont importantes. Enfin, dans les liquides, il ne peut y avoir de résidus que pour des ondes relativement courtes, les fuites étant largement prépondérantes à basse fréquence.

Lorsque, sous l'action d'une cause quelconque, les propriétés mécaniques du diélectrique se modifient, la résistance au déplacement des ions électrolytiques et par suite les pertes varient. C'est ainsi que peut s'expliquer l'influence de la température : à un échauffement correspond en général une augmentation de la viscosité mécanique ; il en résulte une augmentation des pertes et une diminution de l'exposant n . Chaque cas particulier demande d'ailleurs une étude spéciale, la dissociation des impuretés étant elle-même fonction de la température.

CONCLUSION

EN COURANT CONTINU, j'ai montré que le PRINCIPE DE SUPERPOSITION, applicable aux corps cristallisés, n'est pas toujours vérifié pour les diélectriques industriels, en particulier pour le papier imprégné ; il se produit dans certains d'entr'eux, sous l'action prolongée du courant continu, une épuration lente qui fait disparaître à la fois les fuites et les résidus.

J'ai obtenu des CYCLES DE VISCOSITÉ de forme elliptique ; il m'a fallu pour cela employer un montage permettant au balistique d'enregistrer des décharges extrêmement lentes.

EN COMPARANT LES DIFFÉRENTES MÉTHODES employées pour déterminer la capacité et les pertes par viscosité, j'ai montré théoriquement et expérimentalement qu'elles ne pouvaient donner de résultats identiques ; j'ai PERFECTIonné certaines d'entre elles, notamment celle du pont pour les petites capacités.

En étudiant l'influence que pouvaient avoir sur les pertes un certain nombre de facteurs, j'ai obtenu les résultats suivants :

Les pertes et la capacité résiduelle sont généralement proportionnelles à une CERTAINE PUISSANCE DE LA FRÉQUENCE.

Pour un corps solide et homogène, les pertes varient, en première approximation, proportionnellement à une certaine puissance de la TEMPÉRATURE. Pour les corps susceptibles de fondre ou de devenir pâteux aux températures étudiées, les lois de variation sont plus complexes.

Lorsque la température reste constante et que le contact entre le diélectrique et les armatures est parfait, l'angle de perte est INDÉPENDANT DE LA TENSION ET DE L'ÉPAISSEUR.

J'ai développé une THÉORIE MATHÉMATIQUE qui s'accorde avec mes résultats expérimentaux.

De l'ensemble de mes expériences, il ressort que les pertes dans les diélectriques sont en général, pour les fréquences usuelles, dues à des impuretés électrolytiques, notamment à l'humidité.

DEUXIÈME THÈSE

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTE

Phénomènes chimiques dans l'accumulateur au plomb

VU ET APPROUVÉ :

Paris, le 29 Mai 1923.

Le Doyen de la Faculté des Sciences,

M. MOLLIARD.

VU ET PERMIS D'IMPRIMER :

Le Recteur de l'Académie de Paris,

P. APPELL.

